



**Analyse structurale et métamorphique des
métasédiments de la zone Briançonnaise au SE du
Pelvoux (Briançon, Guillestre, Alpes Occidentales).
Premières estimations Pression - Température**

Pierre Lanari

► **To cite this version:**

Pierre Lanari. Analyse structurale et métamorphique des métasédiments de la zone Briançonnaise au SE du Pelvoux (Briançon, Guillestre, Alpes Occidentales). Premières estimations Pression - Température. *Géochimie*. 2009. dumas-00446125

HAL Id: dumas-00446125

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00446125>

Submitted on 12 Jan 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Analyse structurale et métamorphique des métasédiments de la zone Briançonnaise au SE du Pelvoux (Briançon, Guillestre, Alpes Occidentales). Premières estimations Pression - Température

Pierre LANARI

Etudiant M2R STE - TS ; Université Joseph Fourier GRENOBLE 1.
Laboratoire de Géodynamique des Chaînes Alpines (LGCA).



Lac de l'Ascension

Pour obtenir le diplôme de Master STE mention TS, spécialité géologie.
Version pdf (diffusée)

Soutenue le : 23 Juin 2009
Devant le Jury composé de :

Examineur : Helle Pederson
Examineur : Anne-Marie Boullier
Rapporteur : Stéphane Schwartz
Directeur : Stéphane Guillot
Co-directeur : Pierre Tricart
Co-directeur : Olivier Vidal



Version du 11 Janvier 2010 déposé sur :
<http://dumas.ccsd.cnrs.fr/index.php>

Corresponding author : 33.(0)4.76.51.40.63 Mail : pierre.lanari@bvra.e.ujf-grenoble.fr

Remerciements :

Je voudrais commencer par remercier Stéphane Guillot, formidable encadrant, avec qui, depuis maintenant 2 ans, j'ai eu l'occasion et la joie de beaucoup apprendre. Cette année, j'ai eu également le plaisir de travailler avec Pierre Tricart, qui m'a fait partager sa passion du terrain (dans les Alpes « Tricardiennes »), ses nombreuses connaissances et m'a encouragé quotidiennement. Mon travail à Grenoble ayant tourné autour des phyllosilicates, j'ai obligatoirement croisé le chemin d'Olivier Vidal. Ce dernier m'a consacré beaucoup de temps pour m'apprendre avec patience les prémices (la suite va être dure...) d'une science qui m'était quasiment inconnue : La Thermodynamique. Ces trois encadrants formidables m'ont toujours ouvert leurs portes lorsque je rencontrais un problème ou quand j'avais besoin d'aide. Encore merci pour tout.

J'ai travaillé avec des scripts développés pour la plupart par des anciens thésards du LGCA. Je remercie Benoit Dubacq, pour les nombreux mails qu'il m'a envoyés (plusieurs pages à chaque fois) me décrivant en détail ses scripts impressionnants. A chaque fois que j'étais bloqué ou que je partais dans une mauvaise direction, il m'a guidé avec ses remarques très constructives. Vincent De Andrade, qui m'a accueilli à l'ESRF, m'a beaucoup aidé notamment avec les manip qu'il avait développées. Il a consacré du temps à traiter partiellement les résultats pour que je puisse les inclure dans mes annexes. Enfin, j'ai compris beaucoup de choses lors des longues discussions pendant la manip XANES.

Beaucoup d'autres personnes se sont impliquées plus ou moins directement dans mes recherches. Je vais, pour faire court, essayer de dresser une liste non exhaustive. Merci à : Mathieu Corrazi (pour l'apprentissage et les discussions sur la microsonde), Gilles Montagnac (pour son accueil et ses conseils à l'ENS Lyon – Spectromètre RAMAN), Olivier Beyssac (pour un entretien téléphonique instructif et vérification de mon travail RAMAN), Sarah Bureau (pour les analyses de chimie que je n'ai pu insérer dans le rapport), Daniel Arnaud (fabrication de lames minces sur du transparent de rétroprojecteur), Rodolphe Pinon (recherche de problèmes sur mon ordinateur), les thésards du LGCA en particulier mes deux « colocataires de bureau » Nico et Yohann, mes enseignants de M2R, ainsi que tous ceux que j'oublie sûrement.

Un grand merci aussi à mes deux collègues géologues du LGCA Marion et Morgane, soutiens perpétuels dans le travail. Comment résumer en quelques lignes une année aussi intense ?

Comme chaque année je remercie Jimmy Bertrand et A.M. Boullier, sans qui je ne serais pas en M2R à Grenoble.

Je garde également un grand merci pour ma famille, et en particulier pour Camille qui m'a apporté son soutien au jour le jour.

- Abstract -

The study of the pressure-temperature (P-T) conditions recorded by the rocks is important to the understanding of the formation of mountain range. In the internal part of the Western Alps, near Briançon and Guillestre, the metamorphic footprint appears relatively weak with only few metamorphic minerals associated. These observations are consistent with the lack of P-T data. We conducted in two selected areas (Clarée and Guillestre) a combined structural, petrological and thermobarometric study in order to define the deformation phases and to propose P-T conditions for the D1 event. The development of thermobarometric methods involving the local equilibria for chlorite-phengite assemblage provides new tool for the study of these low-grade metamorphic areas. Three structural phases are identified in the Guillestre area: (1) A top-to-the-north shearing direction corresponding to the nappe stacking, (2) a westward-thrusting direction associated to the Briançonnais frontal thrust activity and (3) a late top-to-the-east thrusting direction. In the Clarée area, only a prograde D1 event without general orientations and an eastward D3 event can be characterized. We propose that the Clarée area in the “zone Houillère” records a pressure and temperature peak (D1) at 6.2 ± 1 Kbar and $345 \pm 40^\circ\text{C}$. This first result in the French portion of the “zone Houillère” is consistent with other estimations and shows an intermediate geothermic gradient between subduction and collision. This event corresponds to the stacking of the Briançonnais cover and probably occurred between 37 and 34 Ma. In the “nappes briançonnaises” at Guillestre, the metamorphic peak (D1) is estimated at 5.8 ± 1.7 Kbar and $280 \pm 60^\circ\text{C}$. This result shows a low metamorphic grade compared to the Vanoise cover, which illustrates the eastern position of this sample in the Briançonnais frontal thrust.

- Résumé -

L'étude des conditions Pression-Température (P-T) qu'on subi les roches est importante pour la compréhension de la formation des chaînes de montagnes. Dans la zone interne des Alpes de l'Ouest, proche de Briançon et de Guillestre, l'empreinte métamorphique est faible avec des minéraux caractéristiques peu nombreux. Ces observations expliquent la très faible quantité de résultats disponibles. Deux études structurales, pétrologiques et thermobarométriques ont été menées dans les régions de Guillestre et de Briançon, pour définir les différentes phases structurales et déterminer les conditions du pic de métamorphisme (phase D1). L'apparition récente de techniques de thermobarométrie comme l'étude des équilibres locaux pour les couples chlorite-phengite ont fourni de nouveaux outils utilisables dans ces régions. Trois phases structurales distinctes ont été identifiées dans la région des nappes briançonnaises de Guillestre : (1) une phase de cisaillement vers le Nord, correspondant à l'empilement des nappes briançonnaises, (2) un chevauchement vers l'Ouest des terrains briançonnais associé au fonctionnement du Chevauchement Briançonnais Frontal (CBF) et (3) une phase général de rétrocharriage vers l'Est. Dans la zone houillère en Clarée, seules deux phases sont visibles : une phase prograde D1 sans direction préférentielle apparente et une phase D3 vers l'Est. Dans cette zone les conditions du pic de métamorphisme D1 sont estimées à 6.2 ± 1 Kbar et $345 \pm 40^\circ\text{C}$. Ce premier résultat pour la zone houillère française est cohérent avec d'autres estimations et montre un gradient géothermique intermédiaire entre la subduction et la collision. Cet événement correspond à l'empilement des nappes briançonnaises sur la zone houillère et intervient probablement entre 37 et 34 Ma. Dans les nappes briançonnaises de Guillestre, le pic de métamorphisme est estimé à 5.8 ± 1.7 Kbar et $280 \pm 60^\circ\text{C}$. Le gradient géothermique calculé est plus chaud que celui de Vanoise ce qui est expliqué par la position plus à l'Ouest, dans le CBF, de l'échantillon étudié

- Table des Figures -

FIGURE 1 : Carte géologique simplifiée de la chaîne Alpine dans la région de Briançon.	10
FIGURE 2 : Contexte lithostratigraphique et organisation structurale des Nappes de Guillestre.	11
FIGURE 3 : Carte géologique de la Haute Vallée de la Clarée au Nord de Névache.	13
FIGURE 4 : Panorama de Plan de Phasy.	14
FIGURE 5 : Reconstitution de l'orientation de D1.	15
FIGURE 6 : Reconstitution de l'orientation de D2.	16
FIGURE 7 : Reconstitution de l'orientation de D3.	17
FIGURE 8 : Coupe structurale 1:1 du vallon du Chardonnet.	18
FIGURE 9 : Coupe structurale 1:1 de Laval (rive gauche de la Clarée).	18
FIGURE 10 : Organisation structurale des schistosités anciennes (Sa) et principales (Sp) au niveau du prolongement Nord de l'anticlinal de Laval.	19
FIGURE 11 : Image LPNA des grès de la Clarée proche de Laval.	
FIGURE 12 : Variations chimiques (Si vs Al) et variations des pôles de la solution solide dans les muscovites et phengites de la Clarée.	21
FIGURE 13 : Vue en carte des variations chimiques des micas blancs hérités et alpins.	22
FIGURE 14 : image RX des variations de Si dans le granite de Plan de Phasy.	
FIGURE 15 : Variations chimiques (Si vs Al) et variations des pôles de la solution solide dans les phengites du granite de Plan de Phasy.	23
FIGURE 16 : Résultats de l'étude thermobarométrique sur les couples chlorites/phengites pour la zone Houillère de la Clarée.	24
FIGURE 17 : Analyse des températures de cristallisation des chlorites.	25
FIGURE 18 : Droites d'équilibres micas + quartz + eau pour les micas de la Clarée.	26
FIGURE 19 : Droites d'équilibres micas + quartz + eau pour les phengites du Granite de Plan de Phasy.	27
FIGURE 20 : Température de cristallisation des chlorites du Granite de Plan de Phasy.	27
FIGURE 21 : Décomposition spectrale du signal RAMAN de la MC.	28
FIGURE 22 : Carte du Pic thermique alpin tirée de l'étude RAMAN de la Matière Carbonée pour la Clarée.	29
FIGURE 23 : Coupe structurale entre Embrun et la Pointe de Rasis avec les résultats de l'étude RAMAN.	29
FIGURE 24 : Résultats et interprétation des résultats thermobarométriques pour le Houiller de la Clarée.	30
FIGURE 25 : Résultats et interprétation des résultats thermobarométriques pour le Granite de Plan de Phasy.	32
FIGURE 26 : Comparaison graphique des résultats de l'étude thermobarométrique de la Clarée et du granite de Plan de Phasy avec les travaux de Gerber (2008) et de Strzeczynski et al. (soumis) plus au Nord.	33
	34

- Table des Matières -

Abstract / Résumé.

Table des figures.

Abréviations et conventions utilisées dans le texte et dans les figures.

1) Introduction.	09
2) Contexte géologique.	09
2.1) Contexte tectonique des Alpes Occidentales.	09
2.2) Unités géologiques de la zone d'étude.	10
2.2.1) Nappes Briançonnaises de Guillestre.	10
2.2.2) La zone Houillère de la Clarée.	12
3) Evolution structurale de la zone Briançon – Guillestre.	12
3.1) Analyse structurale des Nappes Briançonnaises de Guillestre.	12
3.1.1) Définition des phases tectoniques.	12
3.1.2) Synthèse.	16
3.2) Analyse structurale du Houiller de la Clarée.	17
3.2.1) Déformation et phases tectoniques.	17
3.2.2) Synthèse.	19
4) Evolution métamorphique de la zone Briançon – Guillestre.	19
4.1) Démarche de travail et objectifs.	19
4.2) Méthodologie.	20
4.3) Minéralogie et paragenèses rencontrées.	21
4.3.1) Houiller de la Clarée.	21
4.3.2) Nappes Briançonnaises de Guillestre.	23
4.4) Analyses in-situ et estimations thermobarométriques.	24
4.4.1) Houiller de la Clarée.	25
4.4.2) Nappes Briançonnaises de Guillestre.	27
4.5) Etude RAMAN de la matière Carbonée et pic thermique.	28
4.5.1) Tmax dans le Houiller de la Clarée.	29
4.5.2) Tmax dans les Nappes Briançonnaises de Guillestre.	30
4.6) Synthèse de l'évolution métamorphique des deux massifs.	30
5) Discussion.	31
6) Conclusion.	35
7) Perspectives d'études	36
8) Bibliographie.	36

- Abréviations et conventions utilisées dans le texte et les figures -

Nota bene :

Tous les termes marqués en **italique** et d'une * sont explicités dans un lexique situé en première partie des annexes.

Minéraux et associations minérales :

Alb : Albite	Qzt : Quartz	Phe : Phengite
Chl : Chlorite	Mus : Muscovite	Pla : Plagioclase

Solution Solide Mica Blanc potassique :

Cel : Céladonite	Mus : Muscovite	Prl : Pyrophyllite
Phl : Phlogopite	Prg : Paragonite	

Solution Solide Chlorite :

Am : Amésite	Sud : Sudoïte	Daph : Daphnite
Clin : Clinocllore		

Substitutions minéralogiques :

(FM) FeMg_{-1} , Tschermak (TK) $\text{Al}^{\text{IV}}\text{Al}^{\text{VI}}\text{Si}_{-1}(\text{Mg,Fe})_{-1}$, Di/trioctahédrale (DT) $(\text{Mg,Fe}^{2+})_3\Box_{-1}\text{Al}_{-2}$, paragonitique (PG) K_{-1}Na , (AF) $\text{Al}_{-1}\text{Fe}^{3+}$ et Pyrophyllitique (P) $\text{KAlSi}_{-1}\Box_{-1}$.
Le « $_{-1}$ » indique tous les termes d'un même côté de l'équation (exemple : FeMg_{-1} correspond à une substitution $\text{Fe} \leftrightarrow \text{Mg}$).

Phases tectoniques et marqueurs associés :

Phase 1 (D1) ; Plis 1 (P1) ; Schistosité 1 (S1) ; Linéation 1 (L1).
Phase 2 (D2) ; Plis 2 (P2) ; Schistosité 2 (S2) ; Linéation 2 (L2).
Phase 3 (D3) ; Plis 3 (P3) ; Schistosité 3 (S3) ; Linéation 3 (L3).

Abréviations diverses :

CBF : Chevauchement Briançonnais Frontal.	MC : Matière Carbonée.
LP(N)A : Lumière Polarisée (Non) Analysée.	MSE : Microsonde électronique.
Wt% : En % du poids total.	A.p.f.u : Atoms Per Formula Unit.

Projections & Canevas :

Toutes les projections stéréographiques sont réalisées sur un canevas de Wulff, hémisphère inférieur, en utilisant le logiciel STEM (communication personnelle, A. Pêcher (2008)).

Notation des échantillons :

Tous les échantillons sont notés : « **PL** » Année – Numéro (exemple : PL08-54 ou PL09-03).

1) INTRODUCTION :

L'étude et la quantification des conditions Pression Température (P-T) enregistrées dans les différentes unités d'une chaîne de montagne sont cruciales pour la reconstitution de la formation et de l'évolution spatiale de la chaîne. De nombreuses études ont été menées sur les zones internes des Alpes et en particulier en Briançonnais de Savoie (voir les travaux récents de : Ganne, 2003 ; Gerber, 2008, Strzeczynski et al., soumis) ce qui augmente le nombre de données thermobarométriques et géochronologiques disponibles. Le prolongement Sud de cette zone dans la région de Briançon ne présente actuellement aucune donnée de type chemin P-T. En effet, cette zone réputée plus froide que son équivalent de Vanoise (Saliot, 1978 ; Goffé, 2004) présente une empreinte métamorphique peu marquée dans des lithologies défavorables. La comparaison des conditions métamorphiques des différents événements entre les parties Nord et Sud de la chaîne est cruciale afin d'estimer l'effet de la cylindricité de l'arc Alpin. Le développement récent de méthodes et techniques thermobarométrique sur les minéraux ubiquistes comme les micas blancs et les chlorites (Vidal & Parra, 2000 ; Parra, 2001 ; De Andrade, 2006 ; Dubacq, 2008) ouvre de bonnes perspectives pour la quantification métamorphique de ces terrains.

Une étude structurale et pétrographique a été conduite dans la région des nappes briançonnaises de Guillestre et dans le Houiller de la haute vallée de la Clarée (Briançon) pour pouvoir fournir des premières estimations P-T et les comparer avec les résultats estimés en Vanoise. 80 échantillons ont été analysés pour essayer de caractériser la phase précoce de Haute Pression (HP). Après une description succincte des différentes formations rencontrées, et de l'évolution structurale des deux régions, nous présenterons les résultats de l'étude thermobarométrique fine de deux échantillons : un grès micacé de la vallée de la Clarée et la lentille de Granite de Plan de Phasy insérée dans le Chevauchement Briançonnais Frontal (CBF). Une étude RAMAN sur la Matière Carbonée (MC) a été également menée en parallèle sur 19 échantillons des deux zones afin de caractériser la température maximale du métamorphisme.

2) CONTEXTE GEOLOGIQUE :

2.1) CONTEXTE TECTONIQUE DES ALPES OCCIDENTALES :

La partie européenne de la chaîne Alpine est l'un des domaines orogéniques le plus étudié au monde. Il s'agit typiquement d'une chaîne de subduction collision (réf in Ganne, 2003) qui consiste en un empilement de terrains d'affinités continentales et océaniques. On distingue classiquement (1) la zone externe, constituée des massifs cristallins externes et de leur couverture mésozoïque et (2) la zone interne constituée, depuis la base de la pile, des

massifs cristallins internes, du domaine Briançonnais, des unités de marge continentales et d'océan (« liguro-piémontais ») et des unités austroalpines (fig. 1). Dans ces zones internes, l'exhumation des unités hautes pressions (HP) et ultra-hautes pressions (UHP) est issu d'un seul épisode orogénique entre 65 et 45 Ma pour les terrains océaniques liguro-piémontais et entre 45 et 35 pour les massifs cristallins internes et la zone briançonnaise (réf. in Strzeczynski et al., soumis).

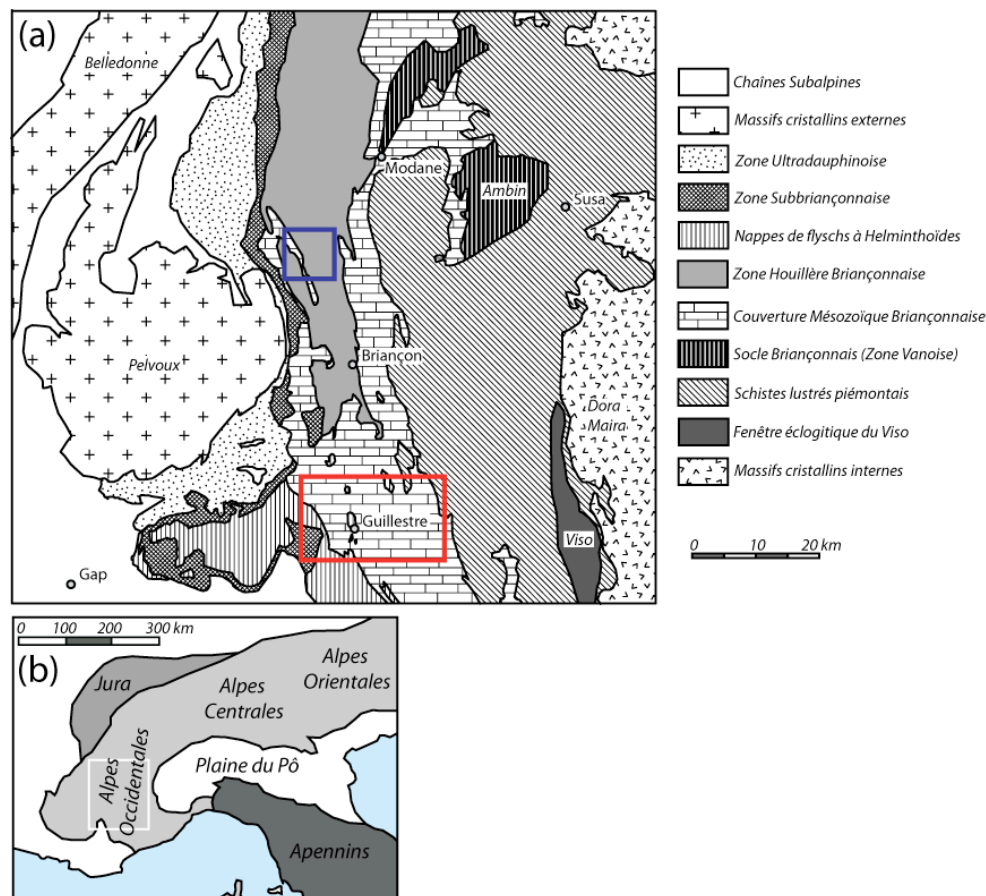


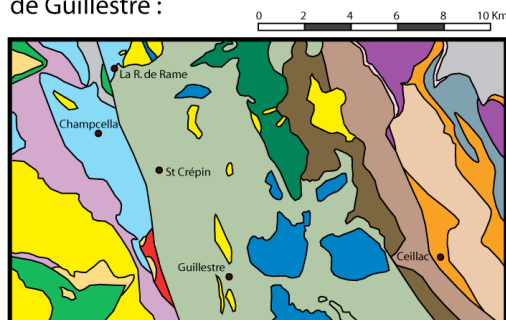
FIGURE 01 : (a) Carte géologique simplifiée des Alpes occidentales dans la région de Briançon-Guillestre d'après Bigdi et al. (1992). Les deux zones d'étude sont localisées sur la figure. Cadre bleu : Zone Houillère de la Clarée ; cadre rouge : Zone des nappes Briançonnaises de Guillestre. (b) Vue générale de l'arc alpin et localisation de la carte (a).

2.2) UNITES GEOLOGIQUES DE LA ZONE D'ETUDE :

2.2.1) NAPPES BRIANÇONNAISES DE GUILLESTRE :

La zone Briançonnaise autour de Guillestre est subdivisée en *nappes** (réf in Kerckhove et al., 2005), empilements de portions de séries sédimentaires du Permien à l'Eocène (fig. 2b-2c). La stratigraphie de ces nappes a été définie par Debelmas, (1955), et réétudiée récemment dans le cadre d'une reconstruction paléogéographique (Claudel & Dumont, 1999 avec références). Le niveau de l'érosion syn-rift dans les nappes a déterminé

(a) Schéma structural du Briançonnais proche de Guillestre :



>> Zone externe :

- Couverture sédimentaire du Cristallin Ultra-dauphinois.
- Nappe de Flyschs à Helminthoïdes.
- Zone Subbriançonnaise.

>> Zone Briançonnaise :

- Zone des écaïles de Plan de Phasy.
- Nappe de Roche-Charnière.
- Nappe de Champcella.
- Nappe inférieure du Guil.
- Nappe de Peyre-Haute.
- Nappe d'Assan.
- Unité de Ceillac.
- Nappe de l'Agnell-Pategou.
- Unité de la Chapelue.
- Unité de la Pointe de Rasis.
- Gypses et cargneules.
- Zone d'Acceglio.

>> Zone Piémontaise :

- Schistes Lustrés de marge.
- Schistes Lustrés océaniques.

(b) Nappe de Peyre-Haute :

(c) Nappe inférieure du Guil :

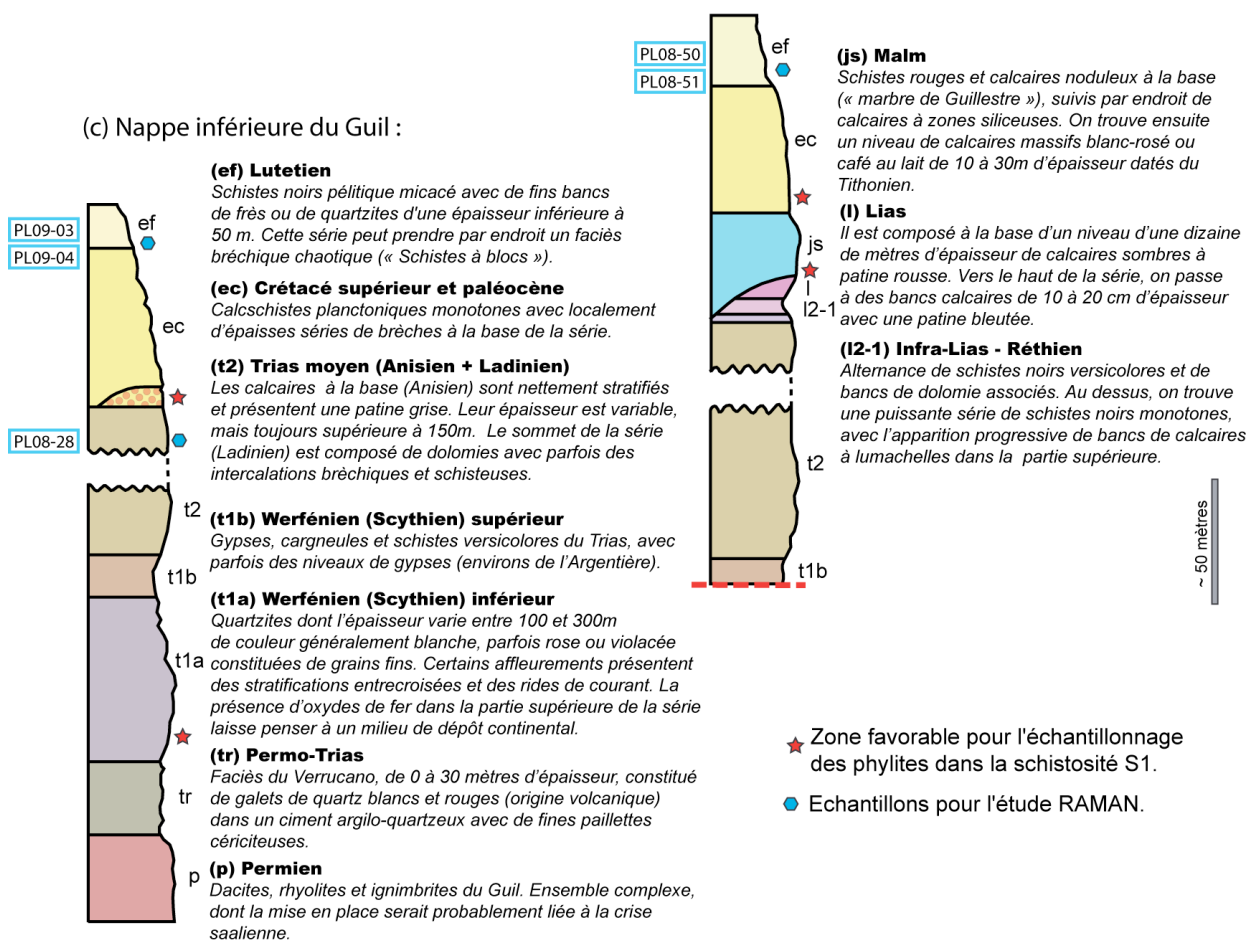


FIGURE 2 : Contexte lithostratigraphique et organisation structurale des nappes de Guillestre. (a) Carte structurale simplifiée d'après Debelman et al., 1966) et Claudel & Dumont, (1999) modifiées. (b)-(c) Logs synthétiques, respectivement de la nappe de Peyre Haute, et de la nappe inférieure du Guil d'après Debelman, (1955) ; Debelman et al., (1966) ; Tricart, (1980) ; Claudel & Dumont, (1999) ; Kerckhove et al., (2005) et nos observations de terrain. Les zones favorables pour un échantillonnage de la S1, ainsi que celles pour une étude de la Matière Carbonnée (MC) sont indiqués sur la figure avec la référence des échantillons correspondants.

les niveaux de décollement dans les différents charriages. Le lecteur pourra se référer aux travaux cités pour une description plus détaillée de la stratigraphie régionale. Notre étude a nécessité une connaissance des différents faciès qui sont présentés sommairement pour la

nappe de Peyre-Haute et la nappe inférieure du Guil (fig. 2b). L'abondance de faciès carbonatés, gréseux ou gypseux très peu favorables à la quantification P-T explique la difficulté rencontrée dans la recherche des minéraux métamorphiques alpins adéquats. Les étoiles rouges représentent les zones qui ont été choisies pour échantillonner des *phyllites** précoces. L'étude des 60 échantillons récoltés dans le secteur a montré que les micas étaient la plupart du temps inexploitable car trop petits ($< 10 \mu\text{m}$), et en nombre trop faible (moins de 1% des minéraux). C'est pourquoi un échantillon des écaïlles de Plan de Phasy, présentant des micas exploitables a été choisi pour l'étude thermobarométrique.

2.2.2) LA ZONE HOUILLÈRE DE LA CLARÉE :

Dans la haute vallée de la Clarée au Nord de Névache affleurent des terrains sédimentaires du Paléozoïque qui se situent en base de la pile des unités briançonnaises. Cet ensemble, couramment appelée Zone Houillère est constituée en majorité de grès micacés avec des niveaux conglomératiques. On trouve également de fines couches de *pélites** sombres et des niveaux *d'antracites**. L'ensemble de ces unités est recoupé par des filons volcaniques *leucocrates** à texture microgrenue (particulièrement dans le vallon du Chardonnet, filons non figurés sur la fig. 3). Ces filons issus d'un volcanisme bimodal (dioritique et granodioritique) sont associés au permien (Barfety et al., 1995). La plupart des attributions d'âges dans le Houiller sont admises traditionnellement et ne sont que peu ou pas corroborées paléontologiquement ce qui empêche d'utiliser la stratigraphie détaillée par Fabre, (1982) pour l'étude structurale. L'étude effectuée dans cette zone s'est limitée aux terrains du *Westphalien** entre Laval et le Lac blanc et dans le vallon du Chardonnet (fig. 3). On note qu'au dessus des terrains du *Werfénien** on retrouve une série « classique » Briançonnaise avec une série datées du Trias au Crétacé. Cette zone Houillère semble alors constituer la « semelle » de la zone briançonnaise comme cela a été longtemps supposé (Réf in Debelmas, 1955).

3) ÉVOLUTION STRUCTURALE DE LA ZONE BRIANÇON – GUILLESTRE :

3.1) ANALYSE STRUCTURALE DES NAPPES BRIANÇONNAISES DE GUILLESTRE :

3.1.1) DEFINITION DES PHASES TECTONIQUES :

Nombre d'études ponctuelles ont été réalisées dans le chaînon alpin entre Briançon et Guillestre (réf. In Gignoux & Moret, 1938) avant les travaux de Debelmas, (1955) qui détaille la stratigraphie des nappes de Guillestre. La microtectonique permet à Tricart, (1980) de caractériser trois phases de déformation D1, D2, D3. Cette superposition est visible à Plan de Phasy (Fig. 4), dans les *écaïlles** tectoniques associées au Chevauchement Briançonnais Frontal (CBF). Ces écaïlles présentent des lithologies contrastées et sont

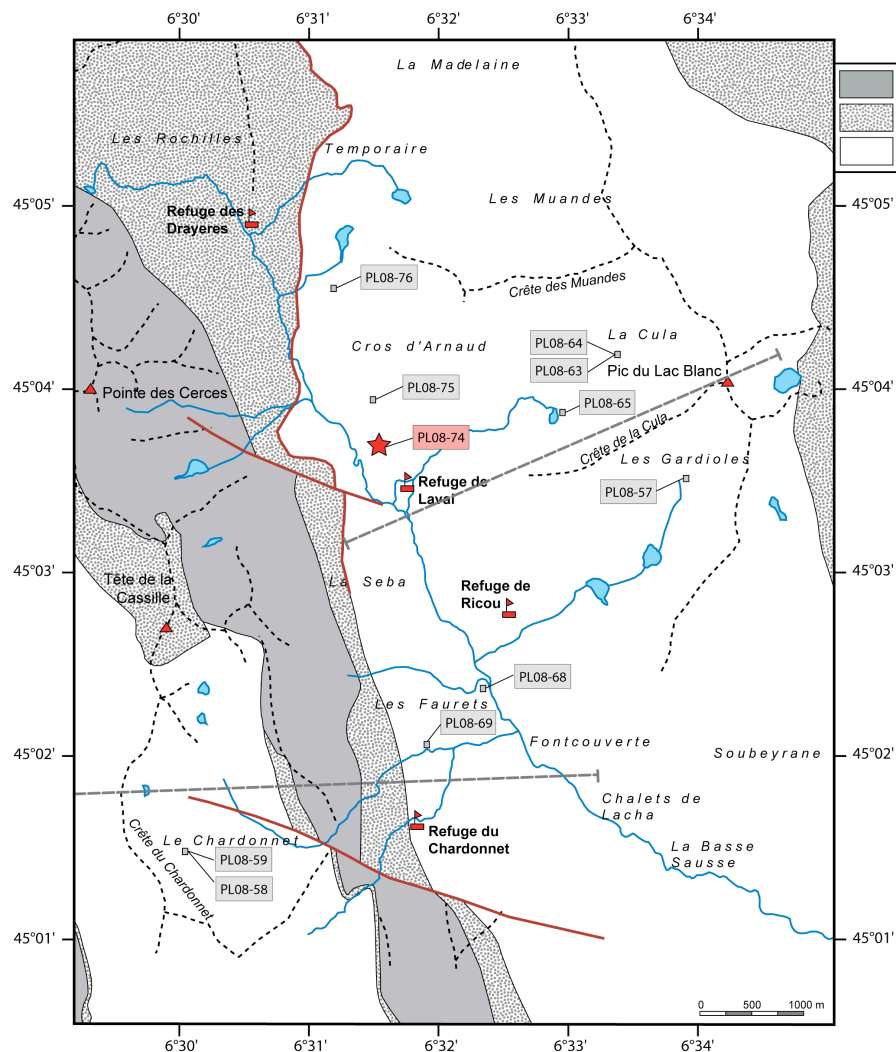


FIGURE 3 : Esquisse géologique de la haute vallée de la Clarée au Nord de Névache, d'après Fabre, (1982) ; Fabre et al., (1982) ; Barfétý et al., (1995) ; Barfétý et al., (2006) et nos observations de terrain. (1) Post-Werfénien, (2) Werfénien à Stéphanien, (3) Westphalien. Les lignes pointillées correspondent aux coupes proposées fig. 8 et fig. 9. Les accidents tectoniques

séparées par des contacts chevauchants. Dans l'échelle la plus à l'Est (fig. 4b), composée de plusieurs lentilles, affleure le « granite de Plan de Phasy » (Kerckhove & Piboule, 1999), qui présente deux *schistosités**. Une schistosité ancienne (S1), illustrée par des niveaux de dissolution autour de feldspaths aplatis et étirés, et une schistosité principale (S2) (fig. 4c.1). Au rocher de Barbein (fig. 4c.2), le seul marqueur de déformation est une *linéation** d'étirement (L2). Dans l'échelle de Flysch noir éocène (fig. 4c3), la S2 est présente, mais reprise par une schistosité de type crénulation (S3). Ces épisodes correspondent à la nomenclature de Tricart, (1980), avec une phase D1 liée à la mise en place des nappes Briançonnaises, une phase D2, liée au fonctionnement du CBF et une phase D3 liée au rétrodéversement vers l'Est avec un plissement généralisé et notamment formation des anticlinaux du Guil et du Cristillan et du pli en retour de la Clapière de Ceillac.

Les fabriques D1 à vergence Nord : La base des calcschistes crétacés, sur l'ancienne Route Royale du Guil, présente une épaisse formation de brèches avec des

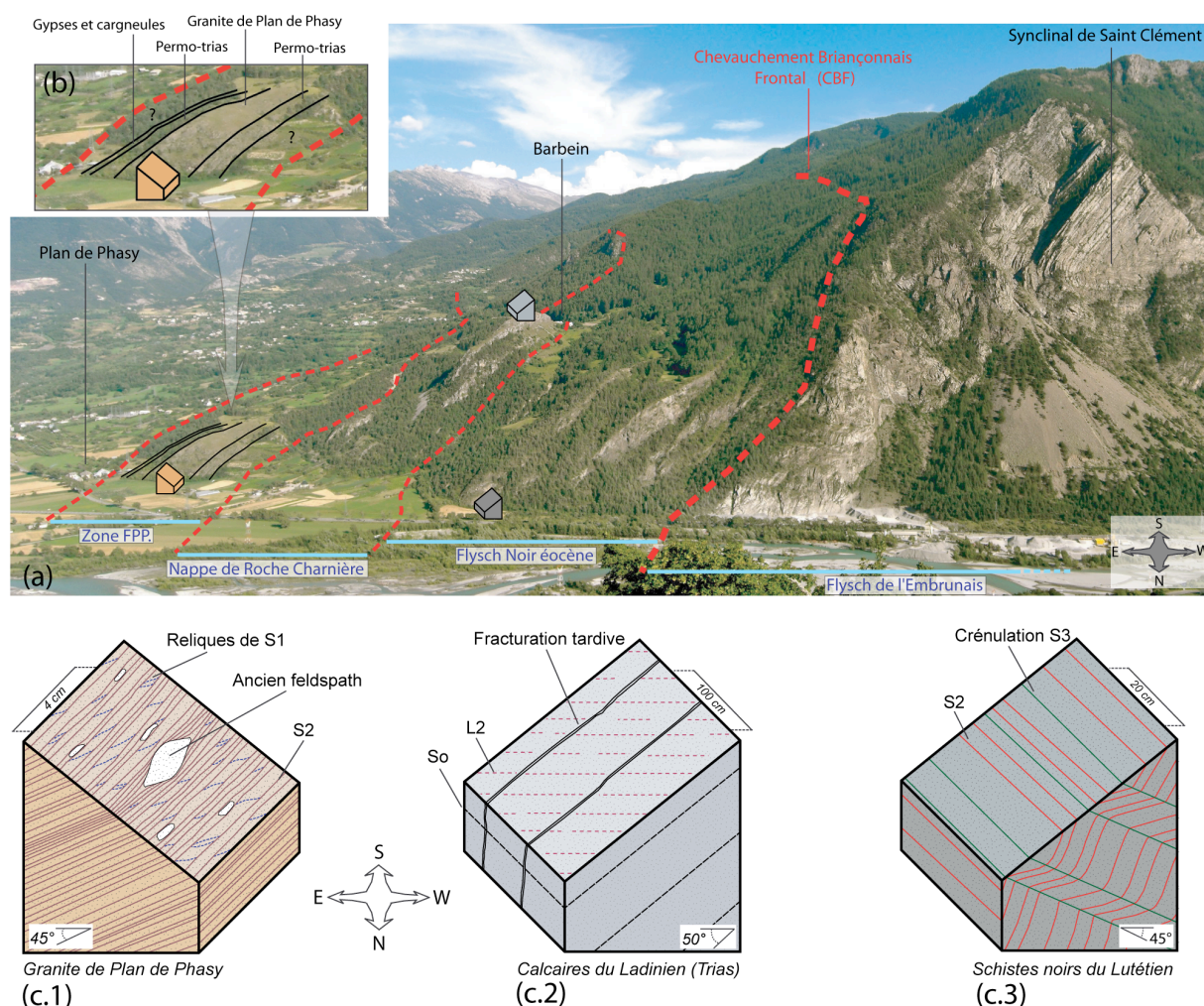


FIGURE 4 : Panorama de Plan de Phasy. (a) Analyse structurale des écaïlles de Plan de Phasy. Les chevauchements sont indiqués en pointillés rouges. (b) Détail de la zone de fracture de Plan de Phasy (FPP). (c) Blocs diagrammes structuraux des affleurements de (a).

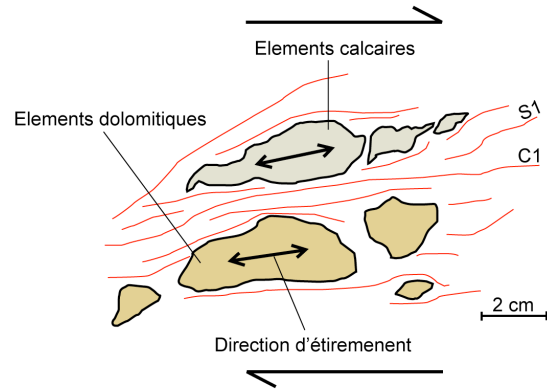
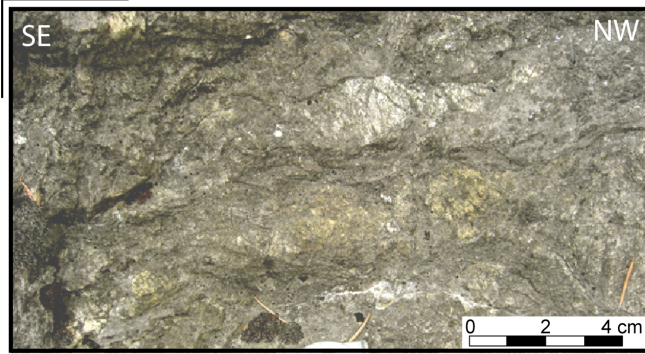
lentilles de schistes verdâtres à une seule schistosité S1. Les éléments calcaires et dolomies y sont fortement étirés (fig. 5a, 5b). La situation de l'affleurement, loin du CBF, sur le flanc occidental de l'anticlinal du Guil, explique l'absence de structures D2. Pour obtenir la direction de la déformation D1, il faut effectuer une remise à plat en utilisant les caractéristiques de l'anticlinal du Guil (Pli P3. Cf. fig. 5b pour la rotation). Cette opération permet de caractériser l'étirement dans les brèches avant la mise en place de l'anticlinal du Guil. Les directions d'étirement calculées (fig. 5c) indiquent une tectonique de cisaillement D1 orientée N155, ce qui est cohérent avec les résultats de Tricart, (1980) pour la même zone et de Strzeczynski et al., (soumis) en Vanoise.

Les fabriques D2 à vergence Ouest : Les structures D2 sont développées proche du CBF. Au rocher de Barbein, les calcaires vermiculés de l'Anisien (fig. 4 et fig. 6a) montrent une linéation d'étirement L2 (fig. 6b). Après remise à plat (fig. 6c), la direction

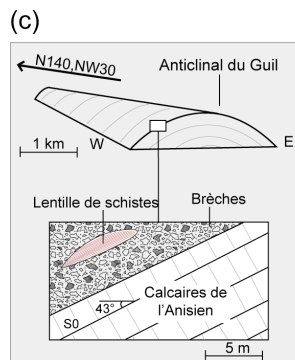
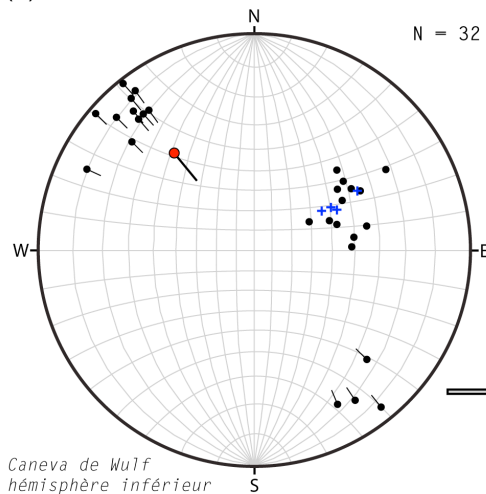
(a) Etirement des éléments calcaires et dolomitiques

N 157, NW 10

Brèche de la Madeleine - Guil

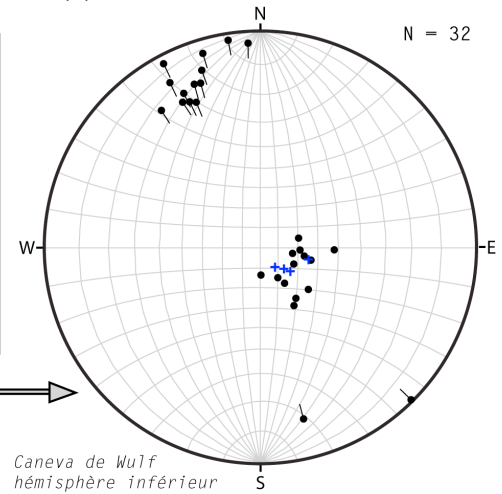


(b) Orientation de l'étirement D1



Rotation de 43° (dextre)
selon l'axe N140, NW30

(d)



- Direction d'étirement des éléments calcaires.
- S1 dans les lentilles de schistes.

- + So au contact brèches crétacées / calcaires de l'Anisien.
- Axe de rotation (N 140, NW30), pour remise à plat des couches.

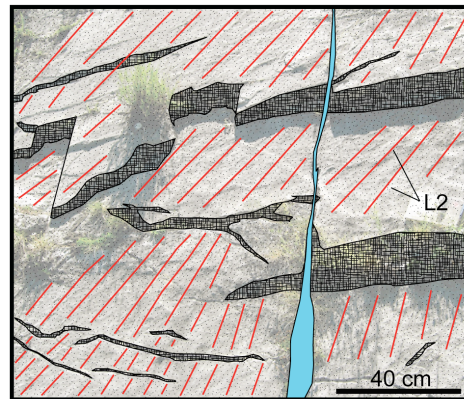
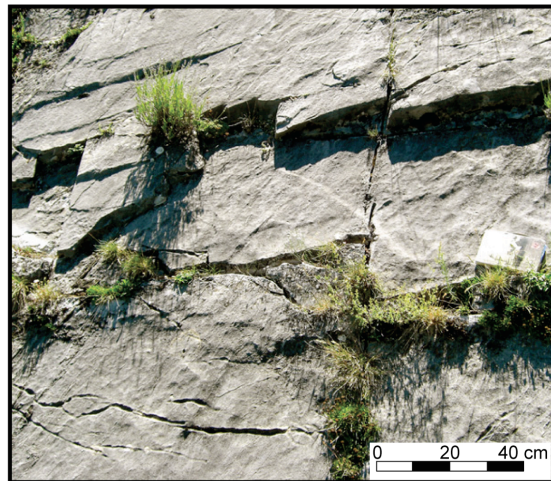
FIGURE 5 : Reconstitution de l'orientation de D1. (a) Etirement des éléments de calcaires et de dolomies, avec développement d'une S1 dans la matrice. (b) Représentation des directions d'étirement L1, des S0 (au contact anisien / brèches crétacé), et des S1 (lentilles schisteuses dans les brèches, cf. fig. 5c). (c) Situation de l'affleurement dans l'anticlinal du Guil. (d) Représentation des directions L1 après correction des déformations D3.

d'étirement présente une orientation E-W (fig. 6d). La structure régionale et en particulier les plis (Synclinal de St Clément, fig. 6a) indiquent un mouvement vers l'Ouest.

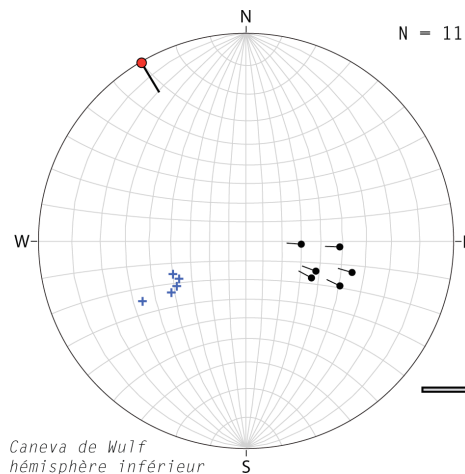
Les fabriques D3 à vergence Est : Les structures D3 ont été utilisées précédemment pour reconstruire les orientations des structures antérieures. Cet épisode a entraîné un replissement de la zone avec des plis d'échelle pluri-kilométriques (Tricart, 1980). A la base des calcschistes, de nombreuses fabriques D1/D3 sont présentes (exemple de Fond Froid et Bois Durat, fig. 7). Ces plans de schistosité sont en zone autour d'un axe N-S (fig. 7c) ce qui est cohérent avec la présence de grands plis d'axes N-S (fig. 7d).

(a) Linéation d'étirement dans les calcaires vermiculés de l'Anisien

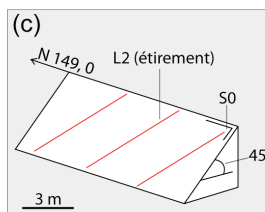
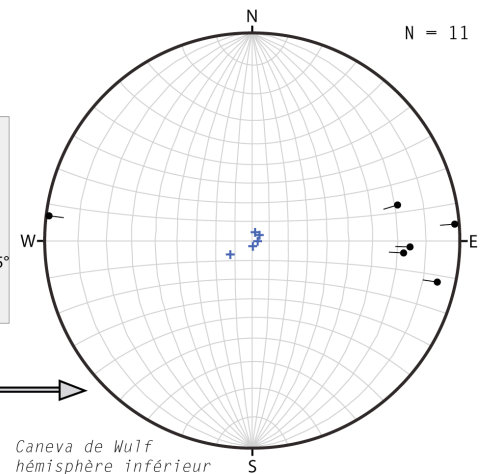
N 140 Calcaires vermiculés de l'Anisien - Barbein



(b) Orientation de la linéation L2



(d) Remise à plat de la So



Remise à plat de So

Rotation de 45°
selon l'axe N140, 0.

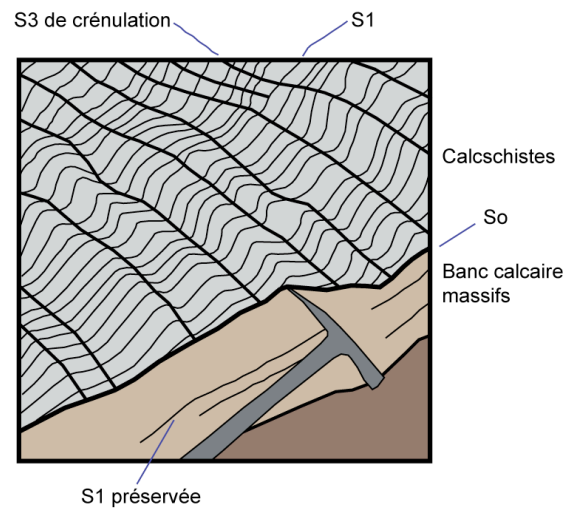
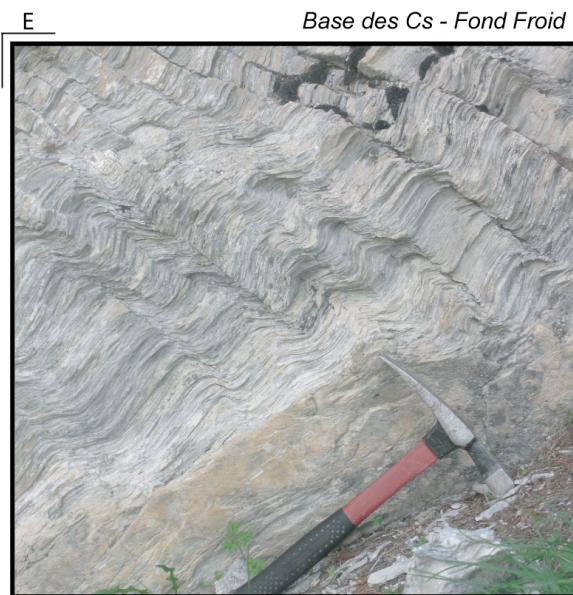
● Linéation d'étirement L2. + So. ● Axe de rotation (N 149, 0).

FIGURE 6 : Reconstitution de l'orientation de D2. (a) Linéation d'étirement de pistes de vers (L2) dans les calcaires vermiculés de l'Anisien. (b) Représentation stéréographique. (c) Remise à plat de la So. (d) Représentation des directions L2 après remise à plat de So.

3.1.2) SYNTHÈSE :

L'étude des déformations dans les nappes de Guillestre confirme une histoire polyphasée. La phase D1 à vergence Nord correspond à l'empilement des nappes Briançonnaises. La phase D2 à vergence Ouest correspond à l'activité du CBF. Enfin, la phase D3 à vergence Est entraîne la formation des grands plis de nappes *rétroréversés**. La rhéologie des différentes lithologies et la position structurale jouent un rôle majeur dans le style de structures et explique que les trois générations de structures ne soient pas visibles partout.

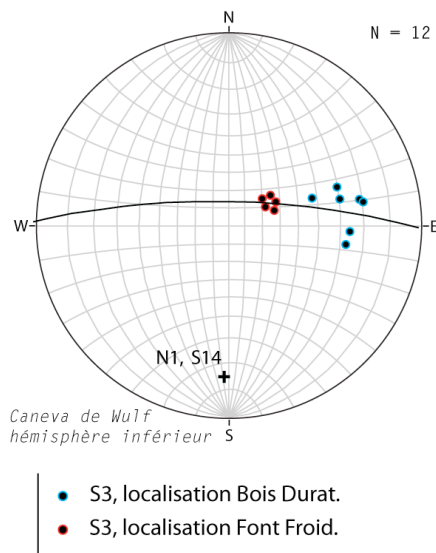
(a) Fabrique S1-S3 dans les calcschistes du Crétacé.



(b) Obliquité S1-So

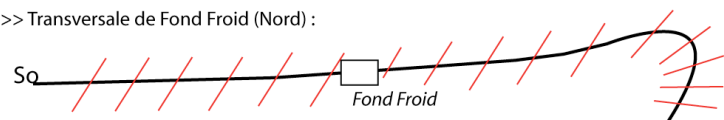


(c) Orientation de la S3 à la base des Calcschistes du Crétacé.



(d) Schéma structuraux :

>> Transversale de Fond Froid (Nord) :



>> Transversale de Bois Durat (Sud) :

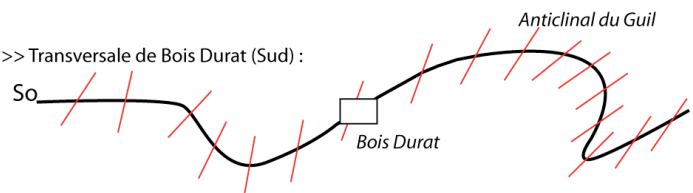


FIGURE 7 : Reconstitution de l'orientation de D3. (a) Fabriques S1-S3 à la base des calcschistes du Crétacé à Fond Froid. (b) Illustration de l'obliquité entre So et S1. (c) Utilisation de l'éventail de schistosités S3 pour construire l'axe de plissement P3. (d) Schéma structural pour la localisation des affleurements dans les structures D3.

3.2) ANALYSE STRUCTURALE DU HOULLIER DE LA CLAREE :

3.2.1) DEFORMATION ET PHASES TECTONIQUES :

La structure du paléozoïque dans la zone briançonnaise au Nord de Névache a été décrite par Fabre, (1982) et Fabre et al., (1982). À l'Est du Queyrellin une déformation pllicative intense est visible sans chevauchements bien caractérisés. La zone Houillère Axiale (fig. 8 et fig. 9 entre le Queyrellin et le Pic du Lac Blanc) présente trois styles structuraux

(Fabre et al., 1982) : (1) une zone à plis droits non déversés (qui affleurent entre le Queyrellin et la Clarée, voir fig. 8), (2) une zone intermédiaire plus ou moins déversée (plis de Laval, voir fig. 9) et (3) une zone à plis couchés déversés vers l'Est (Crête de la Cula et Lac Blanc, voir fig. 9). Cette zonation illustre trois niveaux structuraux de profondeurs différents lors du passage d'une nappe chevauchante (Fabre et al., 1982). L'étude de la partie du Chardonnet à l'Ouest du Queyrellin (fig. 8) met clairement en évidence des structures déversées vers l'Ouest et illustre parfaitement l'*éventail** tectonique de la zone Houillère. Par contre, aucun argument de terrain ne nous permet de supposer, comme Fabre et al., (1982), l'existence d'une désolidarisation entre le paléozoïque et le mésozoïque (exemple : pli du Queyrellin, voir fig. 8).

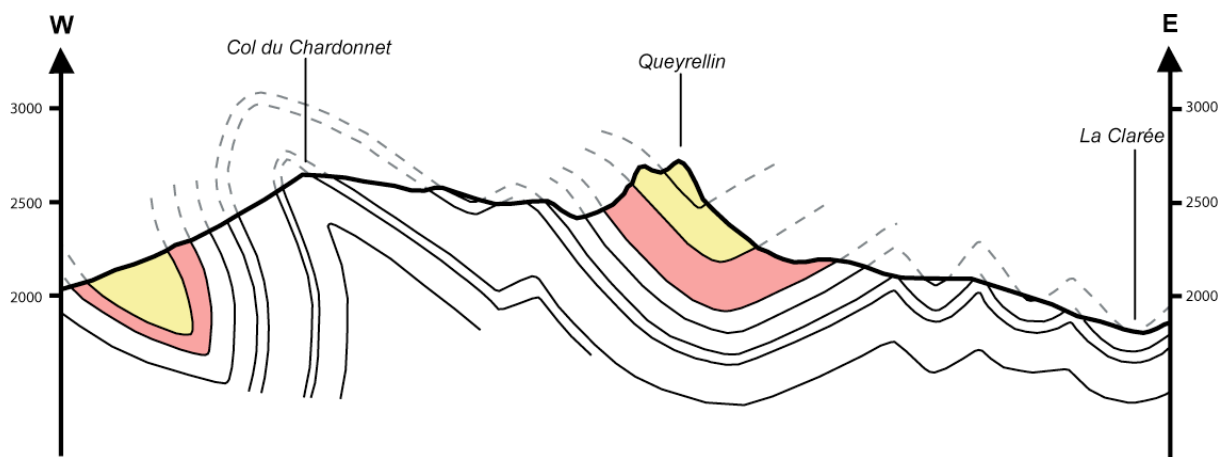


FIGURE 8 : Coupe structurale 1:1 du vallon du Chardonnet. La position de la coupe est localisée sur la fig. 3. Les terrains Westphaliens sont représentés en blanc, les terrains Werfénien à Stéphaniens en rouge et les séries mésozoïques en jaune. La partie à l'Est du Queyrellin représente la zone à plis droits non déversés de Fabre et al., (1982).

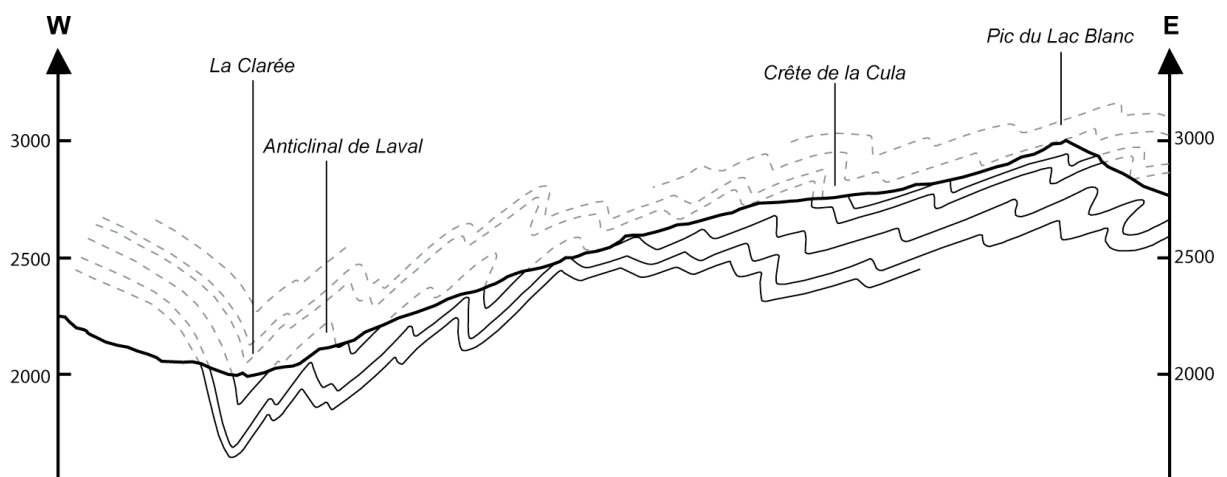


FIGURE 9 : Coupe structurale 1:1 de Laval (rive gauche de la Clarée). La coupe est localisée sur la fig. 3. Les terrains Westphaliens sont représentés en blanc. La partie Clarée – Laval représente la zone partiellement déversée définie Fabre et al., (1982) et la zone Cula – Lac Blanc, la zone fortement déversée vers l'Est.

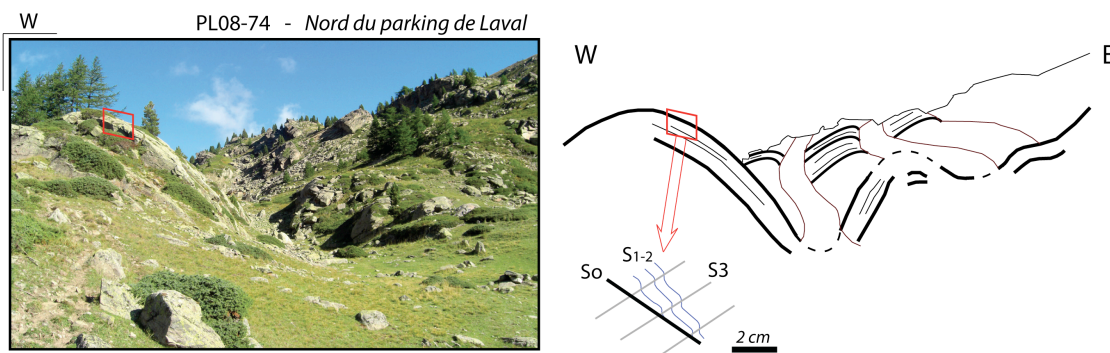


FIGURE 10 : Organisation structurale des schistosités anciennes (S1-2) et principales (S3) au niveau du prolongement Nord de l'anticlinal de Laval. Dans le cœur des plis P3 (cadre rouge), on distingue par endroit une schistosité ancienne (S1-2) qui forme un angle faible avec la stratification (So) déformée par une schistosité principale (S3) de type crénulation associée à la mise en place des plis P3.

Deux schistosités, une ancienne S1-2 et l'autre principale S3 ont été mises en évidence (Fabre et al., 1982) et sont illustrées fig. 10. La S1-2 quand elle est préservée présente toujours des angles très faibles avec la So et ne possède pas de structures macroscopiques associées ce qui empêche toute reconstruction structurale. La Schistosité S3 associée aux plis P3 déversés vers l'Est (fig. 10) est présente systématiquement dans les terrains paléozoïques, même si elle est peu pénétrative dans les bancs épais de grès micacés.

3.2.2) SYNTHÈSE :

La zone des nappes de Guillestre présente trois schistosités associées à trois événements D1, D2, D3. La zone houillère de la Clarée présente deux schistosités, dont une principale (S3) associée à un plissement généralisé vers l'Est. La schistosité ancienne S1-2 du Houiller Briançonnais est à relier soit à S1, soit à S2. Cette correspondance sera discutée lors de l'étude thermobarométrique (§ 4.3).

4) ÉVOLUTION METAMORPHIQUE DE LA ZONE BRIANÇON – IUILLESTRE.

4.1) DEMARCHE DE TRAVAIL ET OBJECTIFS :

Dans la région Briançon – Guillestre, quelques études minéralogiques ont été menées (Saliot, 1978, Goffé et al. 2004) mais aucune esquisse de chemin P-T n'est actuellement disponible. L'objectif de cette étude a été de proposer un trajet P-T pour les nappes briançonnaises de Guillestre et pour le Houiller de la Clarée comme cela a été réalisé en Vanoise récemment (Ganne, 2003 ; Gerber, 2008 ; Gabalda, 2008). Dans les deux zones échantillonnées, l'étude minéralogique a été cruciale afin de distinguer les *minéraux métamorphiques** des *minéraux hérités**. Les faciès ont été sélectionnés pour leur

richesse en micas blancs potassiques (*phengites**) et chlorites. L'utilisation systématique de la cartographie RX à la microsonde a permis d'obtenir un nombre d'analyses important (entre 98 000 et 200 000 points par échantillon) pour caractériser les variations spatiales de la chimie. Enfin la présence dans de nombreux faciès de Matière Carbonée (MC) plus ou moins graphitisée nous a conduit à réaliser une étude RAMAN sur les deux zones d'études.

4.2) METHODOLOGIE :

L'estimation des conditions P-T à partir des couples chlorite-phengite requiert l'utilisation de pôles purs des solutions solides pour lesquels les données thermodynamiques sont connues. Les formules structurales ont été calculées sur la base de 11 atomes d'oxygène pour les micas et de 14 pour les chlorites, en suivant les répartitions d'atomes sur les sites minéralogiques et les modèles de solution solide de Vidal & Parra, (2000) ; Vidal et al. (2001, 2005, 2006), Parra et al., (2002). Pour les phengites (Parra et al., 2002, cf. Annexe 5) les pôles muscovite (mus), pyrophyllite (prl), céladonite (cel), paragonite (prg) et phlogopite (phls) ont été utilisés, et pour les chlorites (Vidal et al. 2005) amésite (am), clinochlore (clin), daphnite (daph) et sudoïte (Sud). Selon Vidal et Parra, (2000), les variations chimiques des micas blancs répondent aux 6 substitutions suivantes : (FM) FeMg_{-1} , Tschermak (TK) $\text{Al}^{\text{IV}}\text{Al}^{\text{VI}}\text{Si}_{-1}(\text{Mg,Fe})_{-1}$, Di/trioctahédrale (DT) $(\text{Mg,Fe}^{2+})_3\Box_{-1}\text{Al}_{-2}$, paragonitique (PG) K_{-1}Na , (AF) $\text{Al}_{-1}\text{Fe}^{3+}$ et Pyrophyllitique (P) $\text{KAlSi}_{-1}\Box_{-1}$, et les variations chimiques des chlorites aux trois substitutions : FM entre les pôles Daphnite et Clinochlore, TK entre amésite et daphnite/clinchlore et DT entre les pôles sudoïte et daphnite/chlinochlore. Toutes les analyses retenues et présentées répondent aux critères de sélection définis par Vidal & Parra, (2000) (Cf. Annexe A3.3).

L'étude minéralogique et micro-structurale réalisée au microscope polarisant permet de repérer les microstructures associées aux structures macroscopiques. Des zones clefs ont été caractérisées et analysées « chimiquement » à la microsonde électronique à Grenoble, au LGCA, sur une CAMECA X50 à 5 spectromètres. Pour les analyses ponctuelles : une tension de 15 Kv, un faisceau de 3µm de diamètre à 10nA ont été paramétrés. La calibration a été effectuée avec les standards: Almandin (Fe), Bustamite (Mn), Diopside (Mg, Si, Ca), Jadéite (Na), Plagioclase (Al), Rutile (Ti), Sanidine (K), Zirconia (Sr).

Pour les cartographies RX, l'intensité du faisceau a été montée à 100nA, avec un temps de comptage par points (pixel de 5 µm) calibré à 300 ms, ce qui représente les conditions de travail les mieux adaptées (De Andrade 2006). La quantification des images RX est réalisée en utilisant la méthode de De Andrade et al., (2006) avec la création de standards pour chaque phase de l'image sous forme d'analyses ponctuelles géographiquement référencées. La quantification intervient par comparaison des résultats de

ces analyses ponctuelles et de l'intensité (Nb de coups) mesurée lors de la cartographie en utilisant l'équation de Castaing (1951) adaptée par De Andrade, (2006).

4.3) MINERALOGIE ET PARAGENESES RENCONTREES :

4.3.1) HOUILLER DE LA CLAREE :

Certains affleurements du Houiller de la Clarée présentent deux schistosités S1-2 et S3 (§ 3.2.1). L'échantillon sélectionné pour l'étude thermobarométrique est un grès micacé situé dans le cœur d'un pli P2 proche de Laval (fig. 10 fig 11). En lame mince il présente des micas blancs et des chlorites situés entre des grains de quartz et d'*albite** (fig. 10). Les paillettes de micas présentent généralement une orientation correspondant à la S1-2 définie macroscopiquement (§ 3.2.1). La S3 semble moins marquée en lame mince et son caractère crénulant est illustré par le plissement des micas.

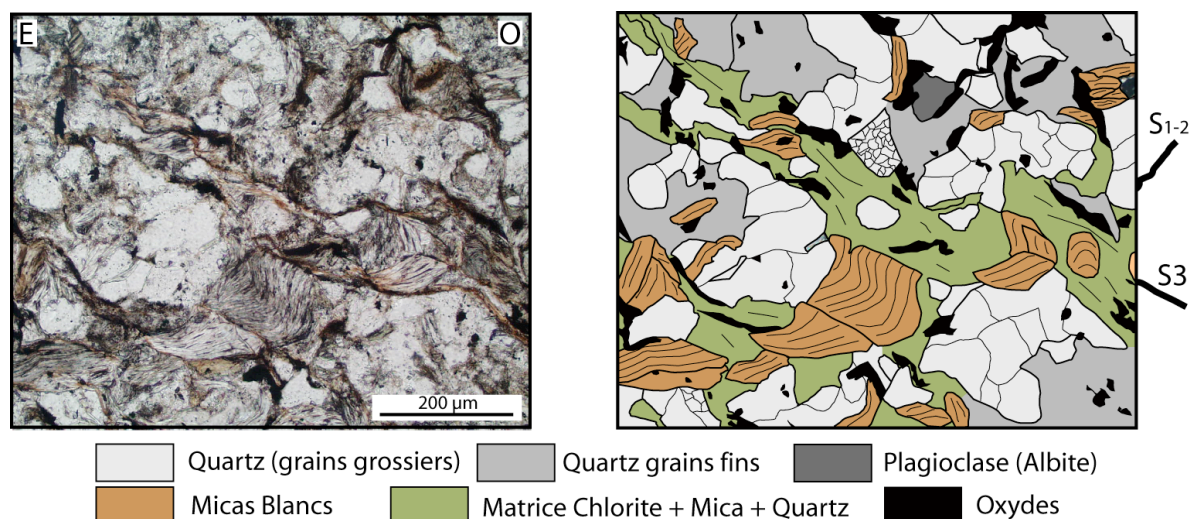


FIGURE 11 : Image LPNA des grès de la Clarée proche de Laval. Les baguettes de micas blancs soulignent la S1-2 et sont déformées par une S3 de type crénulation. Présence de plagioclase, de quartz sous forme de grains grossiers et de quartz finement recristallisé.

Micas blancs : L'étude couplée pétrochimique permet de distinguer trois types de micas blancs : (1) Des muscovites ante-alpines détritiques en larges lamelles incolores tordues et ondulées par les déformations alpines (fig. 11). Leur composition chimique est proche de la muscovite idéale avec $X_{\text{mus}} > 90\%$, des valeurs de $\text{Si}^{4+} < 3.1$ et $\text{Al}^{\text{tot}} > 2.7$ (fig. 12). (2) Des phengites Alpines apparaissent légèrement plus verdâtres et cristallisent dans les zones où la déformation D1-2 semble plus importante (fig. 13). Leur composition chimique montre qu'il s'agit d'une déstabilisation des muscovites avec, une augmentation du X_{cel} ($X_{\text{mus}} < 70\%$), des valeurs de $\text{Si}^{4+} > 3.3$ et $\text{Al}^{\text{tot}} < 2.4$ (fig. 12). (3) La bordure des muscovites présente des compositions intermédiaires avec $70\% < X_{\text{mus}} < 90\%$ et $2.4 <$

$Si^{4+} > 2.7$ témoins d'une recristallisation Alpine. Les variations de Si et de Al entre ces trois groupes montrent que l'on est en présence d'une substitution de type Tschermak (TK). L'évolution cinématique des micas (recristallisation des bordures des muscovites, puis cristallisation des phengites) est corrélée avec une augmentation du Si^{4+} , ce qui indique que les phengites sont *progrades**, liées à l'augmentation de pression. Lors de l'étude thermobarométrique ces phengites vont nous renseigner sur le pic de pression. La schistosité S1-2 marquée par l'orientation des phengites et la réorganisation des muscovites est donc une S1.

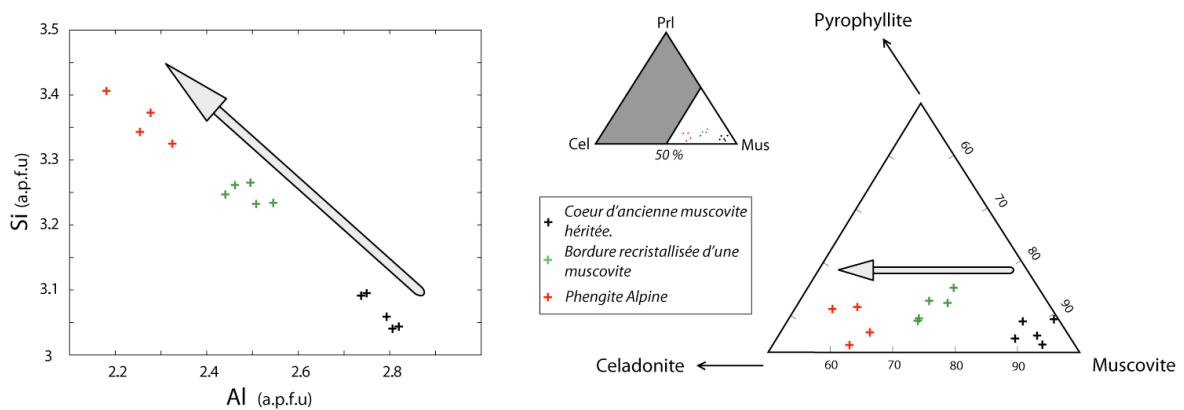


FIGURE 12 : Variations chimiques (Si vs Al) et des pôles de la solution solide dans les muscovites et phengites de la Clarée. Les cœurs des anciennes muscovites sont plus riches en X.mus, en Al et plus pauvre en Si^{4+} que les bordures et les phengites Alpines.

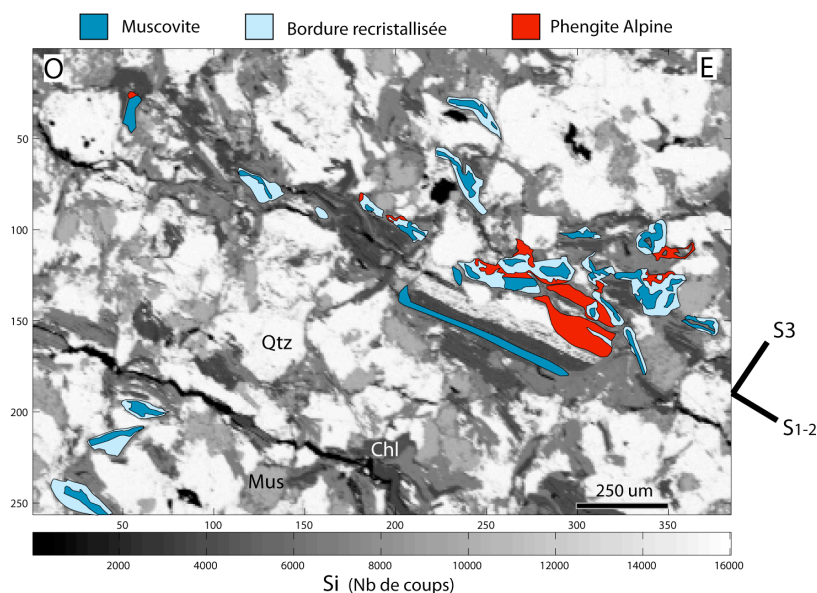


FIGURE 13 : Vue en carte des variations chimiques des micas blancs hérités et alpins. Séparation des phases muscovite ($Si < 3.15$), bordure ($3.15 < Si < 3.3$) et phengites ($Si > 3.3$) sur une image brute Si (en nombre de coups). Qtz, quartz ; Mus, muscovite ; Chl, chlorite.

Les Chlorites : Associées aux micas, elles cristallisent entre les grains de muscovites dans les fabriques S1 et plus rarement dans les fabriques S3.

Macroscopiquement, les chlorites semblent Alpines, mais la détection de chlorites héritées est compliquée en raison de l'absence de marqueur chimique comme le taux de Si dans les phengites. L'âge hercynien ou alpin des chlorites sera discuté (§ 4.4) lors des résultats de l'étude de température.

Autres minéraux : les autres minéraux majeurs (quartz, plagioclases) ou accessoires (oxydes, zircons) ne présentent pas d'intérêt majeur dans l'étude thermobarométrique. La *Lawsonite** notée dans la région par Saliot (1978) et Fabre (1982) n'a pas été observée lors de l'étude des différents échantillons.

4.3.2) NAPPES BRIANÇONNAISES DE GUILLESTRE :

Le granite de Plan de Phasy présente deux schistosités, une S1 marquée par l'orientation des grands micas et une S2, marquée par la cristallisation de chlorite dans des bandes de cisaillement (fig. 14).

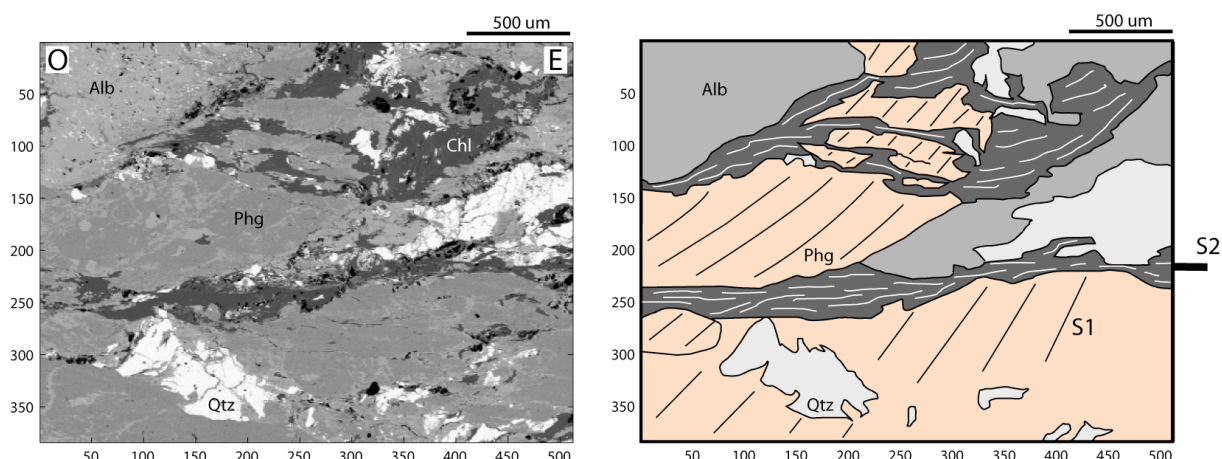


Figure 14 : image RX des variations de Si (brute : blanc = nb de coups élevé ; Noir = Nb de coups faible) dans le granite de Plan de Phasy. Les phengites D1 sont reprises par un cisaillement D2 associé à la cristallisation des chlorites.

Micas blancs : L'étude pétro-chimique des micas indique qu'il s'agit de phengites, avec des compositions intermédiaires entre X.mus et X.cel avec peu de X.Prl (fig.15). Leur teneur en Si est particulièrement élevée avec $3.45 < Si^{4+} < 3.65$. A l'inverse des résultats de Saliot (1978), les phengites les plus *substituées** semblent ici les plus tardives. Les points de la fig. 15 ont été sélectionnés sur un profil cœur-bordure et montrent une évolution de la teneur en X.cel, et comme précédemment une diminution de la teneur en Al avec une augmentation en Si^{4+} . Ces observations indiquent que les phengites du granite de Plan de Phasy sont progrades, liées à une phase d'enfouissement et à une augmentation de pression. Elles vont donc lors de l'étude thermobarométrique donner des indications sur le

pic de pression. Il faut noter qu'une carte avec une meilleure résolution permettrait peut-être de distinguer des cristallisations de phengites dans la S2.

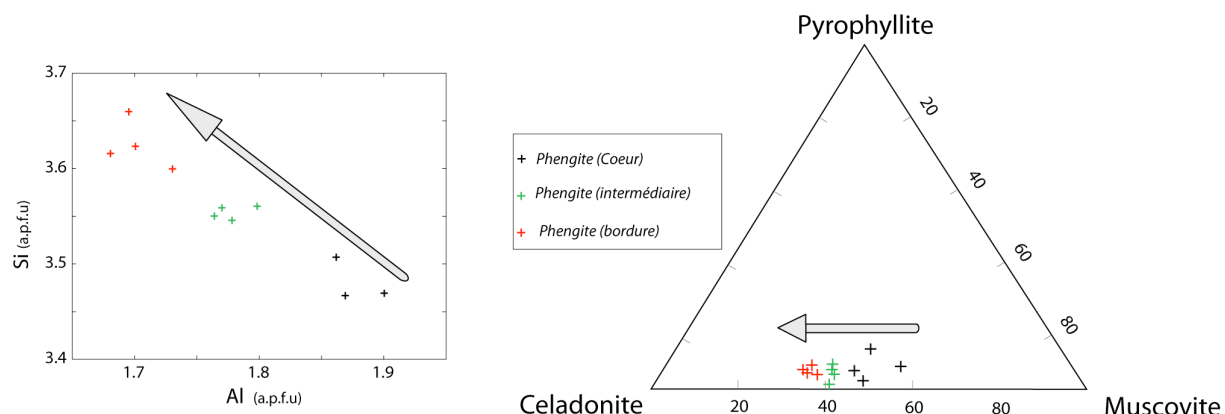


FIGURE 15 : Variations chimiques (Si vs Al) et des pôles de la solution solide dans les phengites du granite de Plan de Phasy. Les cœurs sont plus riches en X.mus, en Al et plus pauvres en Si^{4+} que les zones intermédiaires et les bordures.

Les Chlorites : Elles sont dans ce cas tardives et associées uniquement aux structures 2. Elles soulignent les bandes de cisaillement et les zones fortement déformées.

Autres minéraux : Le quartz et les plagioclases sont en majorité associés aux structures D1 (recristallisés ou réorientés). Une petite partie de quartz recristallise dans les structures D2 au milieu des chlorites (fig. 14). De nombreux oxydes sont présents et aucune trace de graphite n'a été mise en évidence.

4.4) ANALYSE IN-SITU ET ESTIMATIONS THERMOBAROMETRIQUES :

Le principe de calcul des équilibres chlorite-phengite a été présenté en détail par Vidal & Parra, (2000) et de nombreux exemples d'applications sont disponibles (réf. In Vidal 2009 (feuille de calcul non publiée). Dans un système chimique à C composants indépendants, on peut tracer des réactions indépendantes (IR), pour un assemblage minéralogique décrit par N pôles tels que : $\text{IR} = \text{N} - \text{C}$. Si les minéraux sont à l'équilibre, ces courbes se coupent en un point dans le champ P-T, qui correspond aux conditions d'équilibre. Les chlorites et les micas présentent des substitutions qui peuvent être modélisées avec plusieurs pôles de solution solide (§ 4.2). La température des chlorites est calculée pour l'assemblage chlorite+quartz+eau en fonction de l'activité des pôles purs, et donc de la teneur en Fe^{3+} (qui affecte l'activité). Il est important de noter que la teneur en Fe^{3+} des chlorites ne peut pas être mesurée à la microsonde et que des analyses XANES* au synchrotron sont en cours pour valider le modèle (cf. annexe 5). Un mica est utilisé pour

estimer la pression à la température fournie par la chlorite à l'équilibre. Avec les 5 pôles des chlorites et 4 pôles des micas, 64 réactions (5 indépendantes) peuvent être tracées dans le système Si-Al-Fe-Mg-K pour une *paragénèse** à chlorite-mica-quartz-eau. La teneur en eau des micas n'est pas encore incluse dans les calculs, ce qui implique que tous les résultats sont valables pour des micas anhydres. L'incertitude de la méthode et les différentes sources d'erreurs sont discutées en détail par Vidal & Parra, (2000).

Dubacq, (2008) a mis au point une technique pour calculer le gradient P-T de la phengite en fonction de son taux d'hydropyrophyllite. Cette ligne P-T est obtenue en calculant le déplacement de l'équilibre mica-quartz-eau en fonction de l'état d'hydratation du mica. Autrement dit, le long de cette ligne le mica est en équilibre avec le quartz et l'eau, et seul son état d'hydratation varie. Cette technique permet pour une température donnée (par une chlorite par exemple) de modéliser la teneur en eau interfoliaire de la phengite. Un développement à apporter à ces méthodes serait de tenir compte de cet état d'hydratation dans les calculs de pression des couples chlorites-phengites (cf. §7, perspectives).

4.4.1) HOUILLER DE LA CLAREE :

Couples Phg-Chl : 26 couples chlorites-phengites à l'équilibre issus d'analyses ponctuelles et de l'imagerie RX ont été traitées avec la feuille de calcul de Vidal, (2009). Cet outil utilise seulement 11 réactions sur les 64 disponibles. Les résultats (fig. 16) montrent une certaine dispersion avec trois groupes en température (<320°C / 340-360°C / >400°C) avec une distribution en pression entre 3 et 7Kbar.

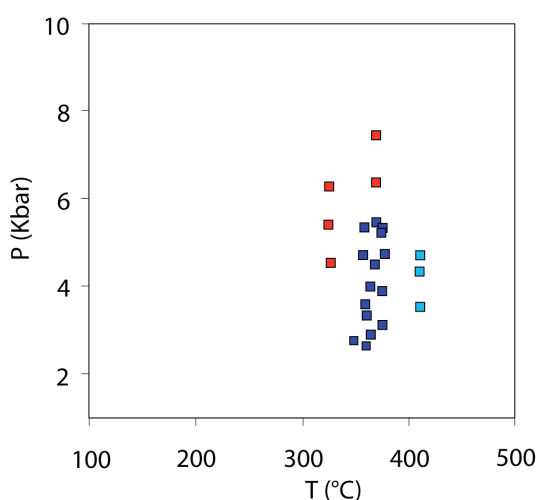


FIGURE 16 : Résultats de l'étude thermobarométrique sur les couples chlorites/phengites pour la zone Houillère de la Claree. Le code couleur correspond aux différents groupes distingués dans l'interprétation. L'incertitude est de +/-1.5 Kbar sur la pression et +/- 40°C sur la température.

Chlorites : Une analyse des chlorites a été réalisée sur les données de l'image RX. Nombre d'études ont mis en évidence une dépendance de la composition chimique des chlorites avec la température (Velde, 1965 ; Cathelineau & Nieva, 1985 ; Vidal & Parra 2000). Les températures ont été calculées pour l'ensemble de la carte avec le thermomètre

empirique de Hillier & Velde, (1991) (Corrélation entre l' Al^{IV} et la température). La méthode de Vidal & Parra, (2000) a été appliquée sur quelques chlorites et une corrélation établie avec le thermomètre d'Hillier & Velde, (1991) (fig.17b). Les températures ont été recalibrées (fig. 17c) et une analyse spectrale effectuée (fig. 17d). On distingue 3 pics principaux de température à 436°C, 329°C et 227°C. Le pic à 436°C met en évidence un héritage d'anciennes chlorites, car cette température n'a pas été atteinte dans la région lors des épisodes alpins (cf. §4.5 et §5).

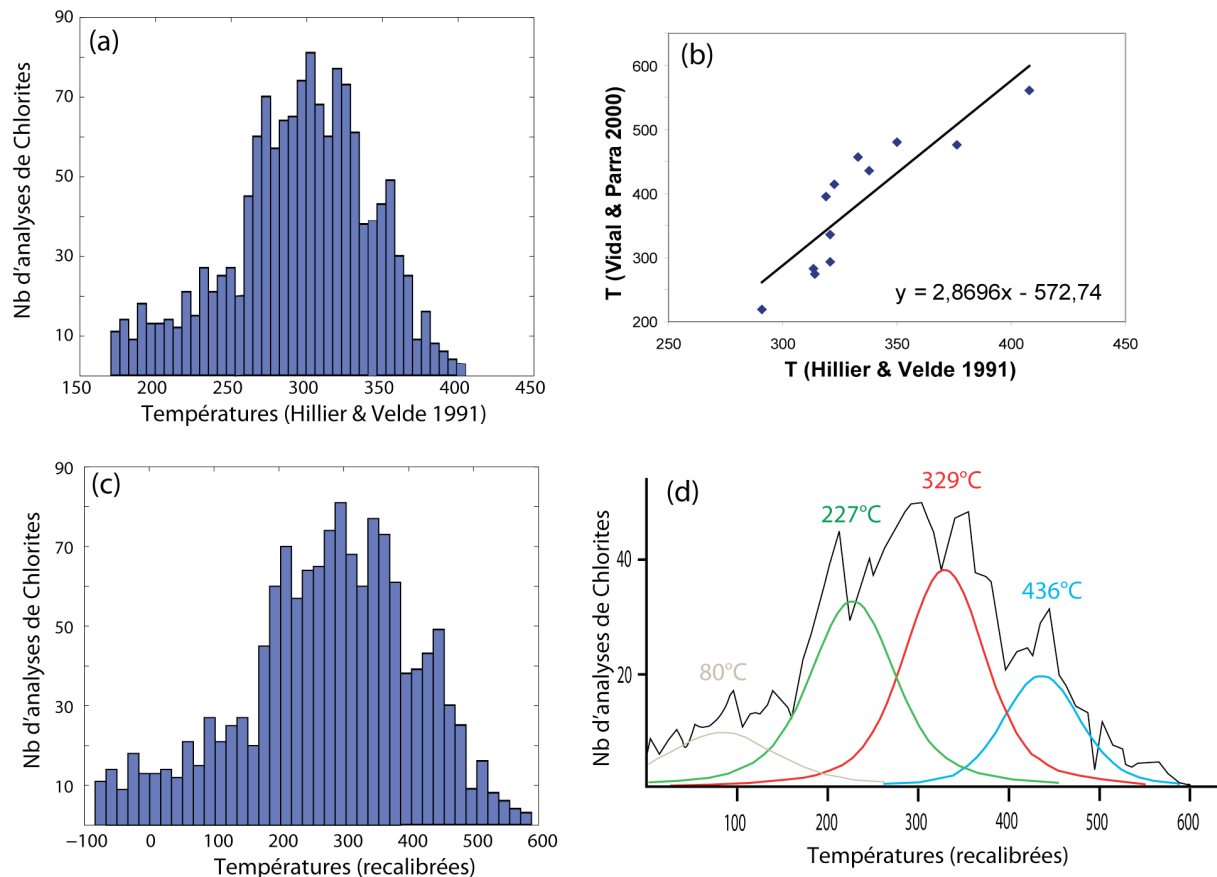


FIGURE 17 : Analyse des températures de cristallisation des chlorites. (a) distribution des températures calculées avec le thermomètre de Hillier & Velde, (1991). (b) Corrélation T (Hillier & Velde, 1991) et T (Vidal & Parra, 2000). (c) Températures recalibrées à partir des résultats de (a). (d) Analyse spectrale des températures recalibrées. L'ensemble des données n'a pas été traité avec la méthode de Vidal & Parra, 2000 en raison du nombre important de points. La calibration est estimée valable pour les températures entre 200 et 500°C (problème de non-linéarité à faible température).

Phengite + quartz + eau : Les équilibres phg+qtz+eau ont été testés pour les micas blancs de la Clarée (fig. 18). Le résultat met en évidence deux groupes de mica, l'un alpin avec des températures autour de 300°C pour une pression de 4Kbar et l'autre ancienne avec des températures de 420°C à 4Kbar. Cette méthode ne permet pas d'estimer les conditions P-T, mais l'on peut en estimant la température de cristallisation des micas (avec par exemple les chlorites à l'équilibre), estimer une pression. Pour une température alpine de 330°C (cf.

fig. 17 & fig. 22), et une température des chlorites héritées de 400°C (fig. 17) on obtient des pressions respectivement d'environ 5Kbar et 4Kbar.

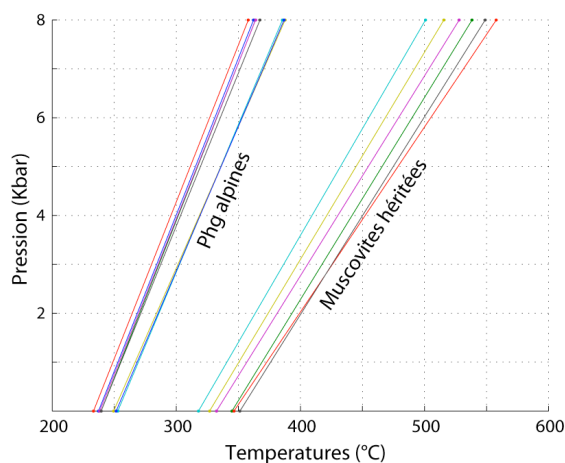


FIGURE 18 : Droites d'équilibres Micas + Quartz + eau (variation de l'hydratation du mica) pour les micas de la Clarée. On trouve deux familles de droite, l'une avec des températures élevées et l'autre avec des températures faibles à pression constante.

4.4.2) NAPPES BRIANÇONNAISES DE GUILLESTRE :

L'étude pétrographique du granite de Plan de Phasy a mis en évidence que les phengites et les chlorites alpines identifiées sur l'image RX n'étaient pas à l'équilibre (fig. 14). Cet état ne permet pas l'utilisation du couple chlorite-phengite.

Phengite + quartz + eau : Ces équilibres ont été testés pour les phengites du granite de Plan de Phasy (fig. 19). Contrairement aux résultats de la Clarée, un seul groupe de phengite relativement homogène apparaît. Pour une gamme de pression de 4 à 6Kbar, la gamme de température correspondante est de 250 à 300°C.

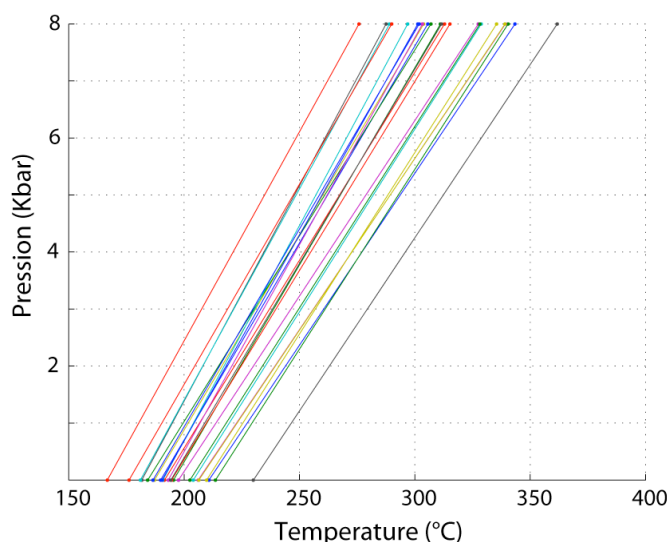


FIGURE 19 : Droites d'équilibres Micas + Quartz + eau (variation de l'hydratation du mica) pour les phengites du Granite de Plan de Phasy.

Chlorites : Dans le granite de Plan de Phasy, elles cristallisent dans la S2, et les températures calculées avec le thermomètre de Hillier & Velde (1991) montrent une distribution entre 160 et 240°C avec un pic à 200°C (fig. 20).

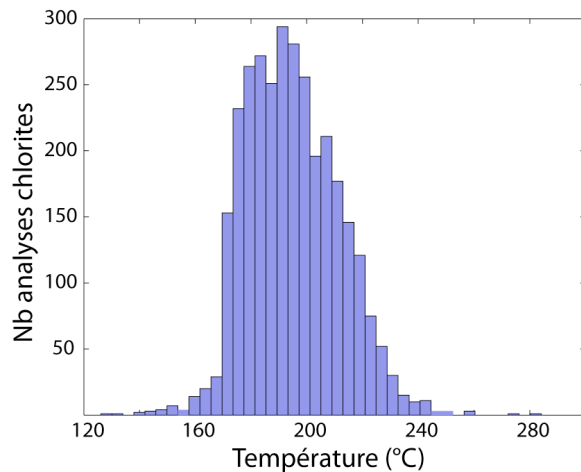


FIGURE 20 : Température de cristallisation des chlorites du Granite de Plan de Phasy. Les températures sont calculées à partir de l'image RX et du thermomètre de Hillier & Velde 1991.

4.5) ETUDE RAMAN DE LA MATIERE CARBONÉE ET PIC THERMIQUE :

La matière carbonée (MC) des roches se transforme durant les processus métamorphiques en graphite. Beyssac et al., (2002) ont montré que le degré d'organisation de la MC est (1) relié à la température maximale (T_{\max}) du métamorphisme et ne dépend pas de la pression, (2) n'est pas affecté par les processus rétrogrades (diminution de température), (3) est corrélé au ratio R2 (rapport d'air des pics) estimable à partir des spectres RAMAN (Bessac et al., 2002, 2005). Les analyses ont été réalisées sur un spectromètre RAMAN Labram (Hr, Visible) au laboratoire de Sciences de la Terre de l'ENS Lyon. Le faisceau a été calibré avec une tension d'excitation de 400mW, et le récepteur avec un réseau de 600 traits et la durée d'enregistrement à 2 fois 60 secondes. Les spectres sont traités avec PeakFit v4, avec : (1) une correction de la ligne de base, (2) une décomposition du signal par déconvolution et (3) un fit. Beyssac et al., (2002) ont montré que la température maximale du métamorphisme était inversement proportionnelle au ratio R2 suivant la loi :

$$T_{\max} (^{\circ}\text{C}) = -445 \times R2 + 641 \quad (1)$$

Avec R2 un rapport d'aires de pics défini par la relation :

$$R2 = \frac{D1}{G + D1 + D2} \quad (2)$$

Avec D1, D2 et G respectivement les aires des pics D1, D2 et G (fig. 21). La relation (1) est valable pour des T_{\max} compris entre 330 et 650 °C (Beyssac et al., 2002). L'incertitude sur la valeur de température a été estimée à +/- 50°C en raison de la possibilité d'avoir plusieurs sources de MC avec des hétérogénéités dues au type de précurseur organique.

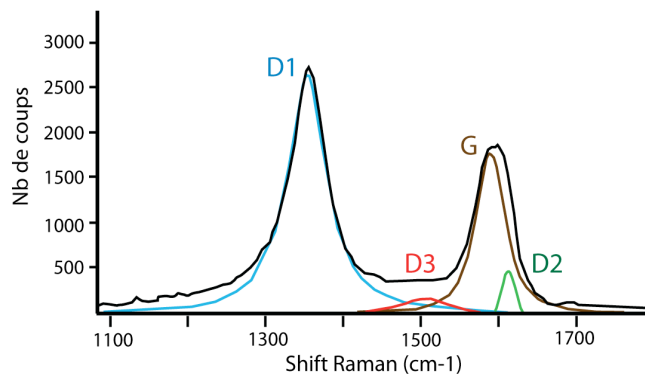


FIGURE 21 : Décomposition spectrale du signal RAMAN de la MC. On distingue les pics D1 (1350 cm^{-1}), D3 (1500 cm^{-1}), G (variable selon le type et la proportion de Graphite) et D2 (1630 cm^{-1})

4.5.1) TMAX DANS LE HOUILLER DE LA CLAREE :

La zone Houillère Briançonnaise est constituée de nombreux niveaux de schistes noirs charbonneux riches en MC. Ces lithologies permettent une étude RAMAN de la Tmax à l'échelle locale. Les résultats sont présentés fig. 22. Pour chacun des 10 échantillons de la Clarée, entre 10 et 15 mesures RAMAN ont été réalisées et traitées. Les spectres pollués ou d'intensité trop faibles ont été écartés. Les résultats (fig. 22) représentent la moyenne des estimations valides. Les valeurs de Tmax obtenues sont relativement homogènes à l'échelle de la zone avec seulement un résultat inférieure à 330°C . La moyenne des températures obtenue est des $335^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$.

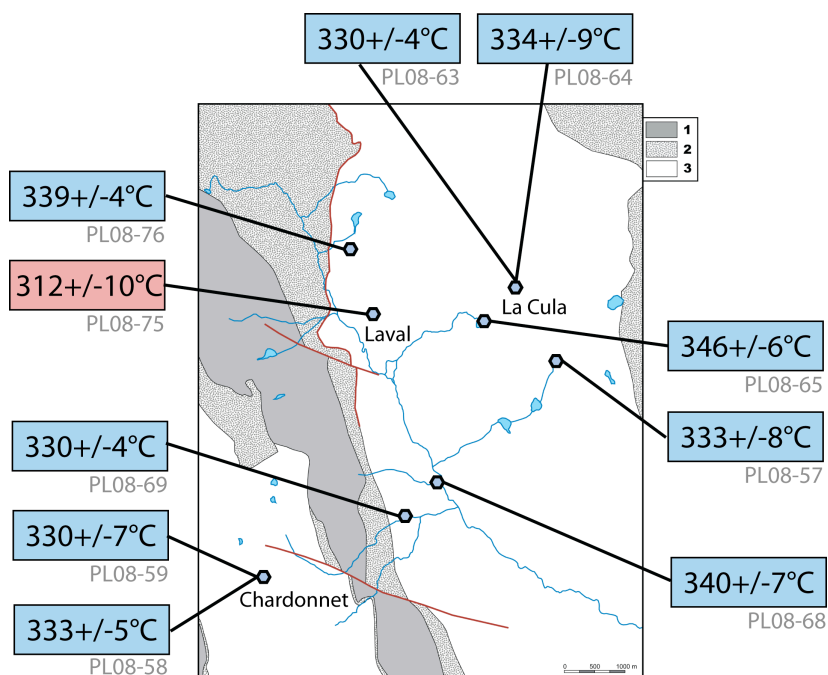


FIGURE 22 : Carte du Pic thermique alpin tirée de l'étude RAMAN de la Matière Carbonée pour la Clarée. Les échantillons étudiés sont localisés sur la carte géologique présentée fig. 3.

4.5.2) TMAX DANS LES NAPPES BRIANÇONNAISES DE GUILLESTRE :

Les faciès des Nappes Briançonnaises de Guillestre (§ 2.2) présentent des lithologies plus variées que le Paléozoïque du Houiller et souvent ne contiennent pas de MC (quartzites, calcaires, dolomites). Les schistes noirs ont été systématiquement recherchés et échantillonnés (fig. 2). Les résultats de l'étude RAMAN peuvent être divisés en trois groupes (code couleur fig. 23). A l'Est de Ceillac, les températures obtenues dans l'unité de la Chapelue et dans les Schistes Lustrés sont similaires avec des températures à 336°C et 332°C. Dans les nappes de Guillestre (entre Guillestre et la Maison du Roy) et dans la zone externe, proche d'Embrun, les températures sont homogènes avec la méthode Beyssac, (2001) à 347°C pour la nappe de Peyre Haute et 334 °C pour la nappe inférieure du Guil. Les spectres de ces échantillons (en gris sur la fig. 23) présentent cependant des caractéristiques différentes à savoir : (1) un décalage systématique de la position du Pic D1 (jusqu'à 1335 cm⁻¹), (2) une augmentation de la position de G (toujours supérieure à 1601 cm⁻¹) qui apporte une difficulté à distinguer le pic de D2 et (3) une proportion de mesures rejetées très importante (jusqu'à 50%). Ces observations portent à croire que les Tmax sont inférieures à 330°C et que la méthode de Beyssac (2001) est alors mal adaptée. Au niveau du CBF, les températures sont inférieures à 330 °C, et une étude qualitative menée par Beyssac sur certaines de nos mesures (Mai 2009, communication personnelle) donne des températures entre 280 et 300°C.

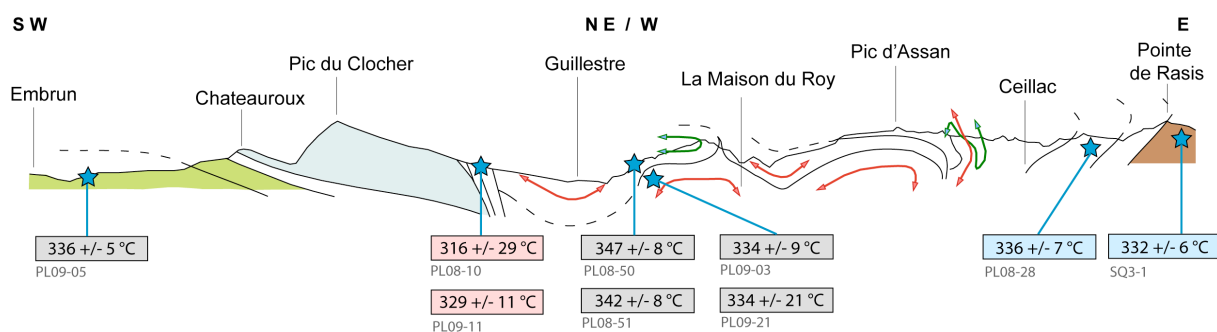


FIGURE 23 : Coupe structurale entre Embrun et la Pointe de Rasis (d'après Tricart, (1980) modifiée) avec les résultats de l'étude RAMAN (projection sur la coupe). Les cadres bleus correspondent aux analyses correctes (voir texte), les cadres gris aux analyses rejetées et les cadres rouges aux résultats inférieurs à 330°C. L'échantillon des Schistes Lustrés (SQ) provient des mesures de Bruand, (2007) et la valeur de température a été recalculée à partir des spectres bruts. Les flèches vertes indiquent les structures de phase D1 et les flèches rouges les structures de phase D3.

4.6) SYNTHÈSE DE L'ÉVOLUTION MÉTAMORPHIQUE DES DEUX MASSIFS :

L'étude RAMAN de la MC dans la région de la Clarée fournit une estimation précise de la Tmax avec une température moyenne de 335°C +/- 50°C. Les résultats des Nappes Briançonnaises de Guillestre sont plus difficiles à exploiter probablement en raison de

températures inférieures à 330°C. On note tout de même à l'Est l'absence de saut thermique de Tmax entre le Briançonnais et l'unité des Schistes Lustrés qui sont là des unités de marge continentale. Pour la zone Houillère, l'étude des *phyllosilicates** permet de caractériser une minéralogie héritée hercynienne et des minéraux métamorphiques alpins. Cette information est essentielle puisque la distinction n'a pas pu être réalisée lors des observations pétrologiques. Les méthodes thermobarométriques mettent en évidence plusieurs conditions PT qui seront interprétées par la suite. Enfin, le granite de Plan de Phasy présente des chlorites et des phengites qui ne sont pas à l'équilibre, mais avec des conditions thermiques probablement très proches entre 200 et 280°C.

5) DISCUSSION :

L'objectif de cette étude a été de fournir des premières conditions PT pour les nappes briançonnaises de Guillestre et pour l'ensemble de la zone houillère des Alpes occidentales. Les résultats montrent la difficulté à distinguer les minéraux alpins et hérités, et à caractériser les phases à l'équilibre. Ces contraintes entraînent l'utilisation de plusieurs méthodes. L'objectif de cette discussion est de proposer, pour chaque zone d'étude, une interprétation globale. Les résultats seront ensuite comparés aux études similaires récentes réalisées plus au Nord.

Le Houiller de la Clarée : La distinction entre minéraux alpins et minéraux hérités est possible uniquement avec une bonne quantification de l'image RX. Plusieurs combinaisons d'équilibres locaux sont possibles entre les chlorites et les micas ce qui explique la dispersion des résultats (fig. 16). Trois groupes ont été distingués (fig. 24), le groupe rouge correspond à des équilibres entre les chlorites alpines du pic thermique et les phengites alpines. Le groupe bleu foncé correspond à des équilibres « virtuels » entre des chlorites alpines du pic thermique et des muscovites héritées et le groupe bleu clair à des équilibres entre des muscovites héritées et des chlorites héritées. Cette distinction est possible en raison du classement des différentes chlorites par température de cristallisation (fig. 17) et la valeur de Tmax à 345 +/- 50°C tirée de l'étude RAMAN. En terme de Pression, les résultats de l'étude phengites + quartz sont cohérents dans les deux cas et permettent de mieux contraindre les estimations P-T. Il est important de noter que de nouveaux calculs d'équilibres de couples chlorite-phengite avec une meilleure sélection des analyses permettraient d'affiner la précision des résultats. Le pic D1 du métamorphisme alpin est estimé à 6.2 +/- 1 Kbar et 345 +/- 40°C. L'incertitude globale résulte de la prise en compte des incertitudes de chaque méthode. Ce résultat est compatible avec la présence de Lawsonite notée par Saliot, (1978) et Goffé et al., (2004) pour la même zone, car les températures sont comprises entre 200 et 400°C pour une pression supérieure à 4Kbar. La

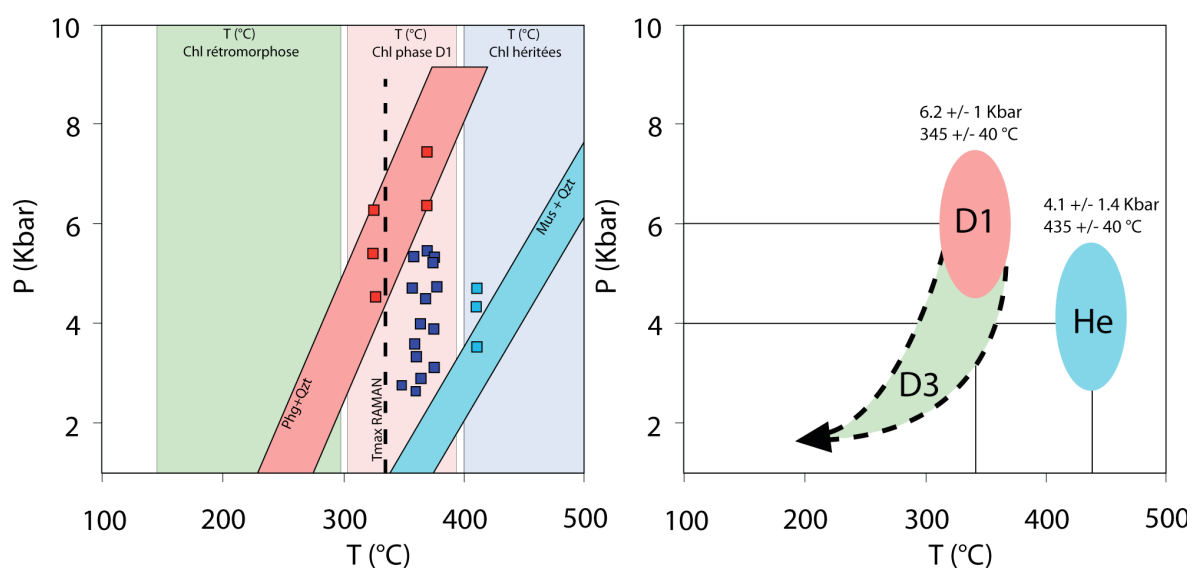


FIGURE 24 : Résultats et interprétation des résultats thermobarométriques pour le Houiller de la Clarée. Figure de gauche : carrés : équilibres entre les couples chlorites-phengites (fig. 16) ; rectangles : distribution des températures des chlorites (cf. fig. 17), Parallélogrammes : résultats des équilibres phg+qtz (fig. 18). Le chemin rétrograde indiqué sur la fig. de droite n'est pas contraint.

résolution de l'image RX n'a pas permis de mettre en évidence des phengites de rétromorphose contrairement à ce que laissait penser l'étude pétrographique (fig. 11). De nouvelles investigations, avec notamment une meilleure résolution et une carte plus précise, permettraient alors peut être de contraindre le chemin rétrograde proposé fig. 24.

Ces estimations P-T proposées pour le Houiller de la Clarée représentent la première quantification du pic de pression dans la zone Houillère à l'échelle des Alpes occidentales. Nous avons estimé à partir de données de Le Fur (1998) sur chlorites et phengites des conditions pour D1 de 6Kbar et 350°C dans le Houiller de Maurienne. Les résultats de l'étude RAMAN sur la MC sont cohérents avec ceux obtenus par Gabalda et al., (2008). Ces observations indiquent que l'ensemble de la zone Houillère semble avoir une histoire P-T similaire, aux variations de température Est-Ouest (Gabalda et al., 2008) près (faible augmentation de Tmax vers l'Est).

Gradient géothermique intermédiaire en zone Houillère : l'estimation P-T de D1 dans la vallée de la Clarée (fig. 26) montre un gradient géothermique intermédiaire (20°C) entre un gradient de subduction (9-10 °C) et un gradient de collision (40°C). Ce gradient est plus chaud que celui estimé dans la couverture de Vanoise (autour de 10°C par Km selon les estimations de la température de D1 ; cf. fig. 26). Cette différence indique que le pic de pression D1 dans la couverture de Vanoise est plus précoce que celui du Houiller. Cette observation est compatible avec une phase D1 dans la zone Houillère liée à l'empilement des nappes briançonnaises à l'Est de celle-ci. Ce résultat est conforté par le petit saut de Tmax noté par Gabalda et al. (2008) entre la zone Houillère et la couverture de Vanoise, la

phase D1 s'étant produite dans des gradients géothermiques différents. L'existence d'un contact chevauchant entre le Houiller et sa couverture est donc nécessaire, même si il n'a pas été mis en évidence sur le terrain.

Les Nappes Briançonnaises de Guillestre : L'organisation minéralogique du granite de Plan de Phasy est plus simple, sans minéraux chlorites et phengites héritées et montre que ces deux minéraux ne sont pas à l'équilibre (fig. 14). Ce résultat important réduit les outils thermodynamiques disponibles pour caractériser les conditions P-T des différentes phases. Les résultats de l'étude RAMAN montrent que la température est inférieure à 330°C et les nouvelles estimations de Beyssac, (2009, communication personnelle) sont basées sur une méthode en cours de développement. Les résultats de l'étude thermobarométrique (fig. 25) confirme le non-équilibre des chlorites et des phengites même si l'incertitude de température est élevée. Une interprétation provisoire est fournie en tenant compte des différents résultats avec un pic de métamorphisme correspondant à la phase D1 à 5.8 +/- 1.7 Kbar et 280 +/- 60°C. Les micas présentent des compositions de phengite (fig. 15) et la possibilité qu'il s'agisse d'argiles a été écartée (en raison du fort taux de remplissage de la couche interfoliaire). La pente de l'équilibre phengite + quartz + eau indique que l'on est dans un contexte différent de celui de la Clarée, puisque celle du granite indique des températures plus froides pour une pression donnée.

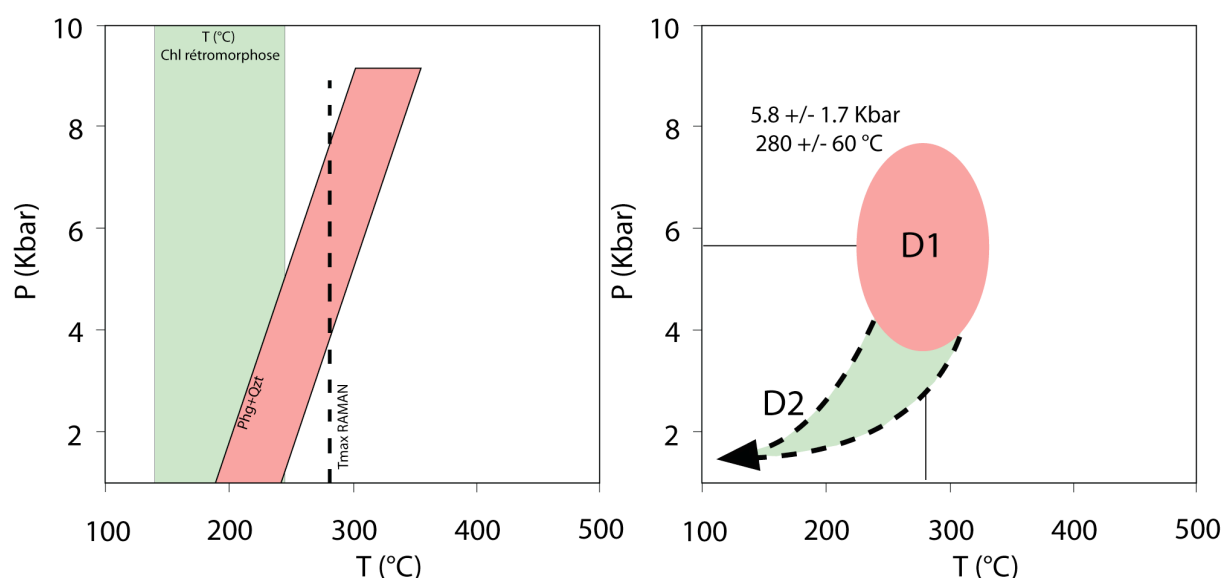


FIGURE 25 : Résultats et interprétation des résultats thermobarométriques pour le Granite de Plan de Phasy. Figure de gauche : rectangle vert : distribution des températures des chlorites (cf. fig. 20), Parallélogrammes : résultats des équilibres phg+qtz (fig. 19). Le chemin rétrograde indiqué sur la fig. de droite n'est pas contraint. Il illustre juste la diminution de la température et de la pression.

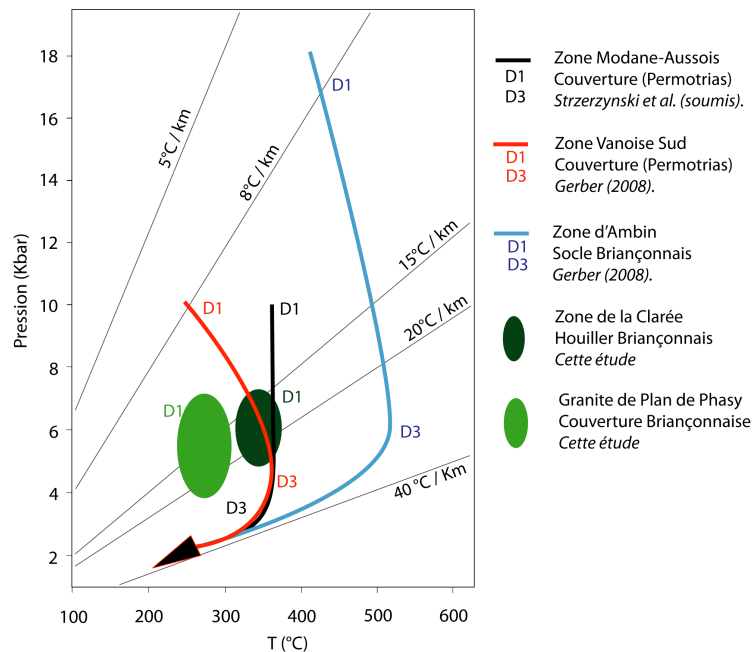


FIGURE 26 : Comparaison graphique des résultats de l'étude thermobarométrique de la Clarée et du granite de Plan de Phasy (phases D1) avec les travaux de Gerber (2008) et de Strzeczynski et al. (soumis) en Vanoise.

La couverture briançonnaise, en particulier le faciès du Permotrias, étudié en Vanoise par Gerber, (2008) présente, dans la lignée des travaux de Ganne, (2003), un réchauffement de 80°C entre la phase D1 (pic de pression) et D3 (pic thermique). Ce réchauffement n'a pas été mis en évidence par Strzeczynski et al., (soumis) dans les mêmes faciès (fig. 26). La pression est bien calibrée dans les deux études avec un pic autour de 10 Kbar. Ces résultats diffèrent fortement des estimations effectuées dans le granite de Plan de Phasy. Cette différence de pression (4Kbar) et en température (70°C) peut être expliquée par la position structurale plus à l'Ouest dans le CBF de notre échantillon.

Synthèse des âges disponibles : Les études thermobarométriques en Vanoise sont accompagnées d'estimation géochronologiques des différentes phases du métamorphisme alpin. La phase D1-D2, indifférenciable en Vanoise à cause d'une transposition trop forte, débute vers 50 Ma pour Gerber, (2008) et se termine vers 38-37 Ma pour Strzeczynski et al., (soumis), Gerber (2008), et réf in. Gerber 2008 fig. V-3. Pour la phase D3 (correspondant au mouvement cisailant vers l'Est), les âges sont compris entre 35 et 32 Ma (Strzeczynski et al., soumis, Gerber, 2008). Des analyses de Traces de Fissions sur Apatites et sur Zircon (TFA & TFZ) dans la région de Guillestre et dans le bassin d'avant chaîne de Barrême (Tricart et al., 2007, Bernet & Tricart, soumis) mettent en évidence un enchainement rapide des phases syncollision (D2 et D3) entre 34 et 32 Ma.

Des nappes briançonnaises de Guillestre diachrones : deux interprétations sont possibles pour cette zone. (1) Soit la température estimée pour la phase D1 est trop faible et donc les pressions obtenues sont sous-estimées. Dans ce cas, le chemin P-T pourrait fortement ressembler à celui de Strzeczynski et al., (soumis) dans le Permotrias de Vanoise. Ce cas de figure semble peu probable en raison de la faible empreinte métamorphique enregistrée dans les nappes et des résultats de l'étude RAMAN de la MC. (2) L'autre solution est une nouvelle fois, une phase D1 un peu plus tardive qu'en Vanoise. Cette conclusion est corroborée par la position de l'échantillon, dans la partie tout à l'Ouest de la zone briançonnaise dans le CBF. Cette hypothèse reste à vérifier en particulier en étudiant la partie Est de cette zone. Pour la phase D3, les âges obtenus au Sud et au Nord sont identiques, aux erreurs près.

6) CONCLUSION :

L'étude métamorphique des zones briançonnaises dans la région de Briançon – Guillestre est délicate en raison de la faible empreinte du métamorphisme et la rareté des minéraux index. Dans les lithologies défavorables, ce handicap peut être contourné en utilisant des méthodes récentes, en particulier l'étude des phyllites. Ce travail a permis de caractériser un pic de métamorphisme à 6.2 ± 1 Kbar et $345 \pm 40^\circ\text{C}$ dans le Houiller de la Clarée et à 5.8 ± 1.7 Kbar et $280 \pm 60^\circ\text{C}$ dans le granite de Plan de Phasy. Les premiers résultats pour la Zone Houillère, sont cohérents avec les travaux RAMAN sur la MC plus au Nord, et avec de nouvelles estimations calculées à partir de données de la littérature. Ils semblent indiquer une phase D1 postérieure (entre 37-34 Ma) à celle de Vanoise (38-37 Ma). Cette phase d'enfouissement est associée à un gradient géothermique intermédiaire subduction-collision expliqué par l'empilement des unités de couverture briançonnaises plus à l'Est sur la zone Houillère. Le granite de Plan de Phasy présente également un gradient géothermique intermédiaire avec une phase D1 plus tardive. Cet enregistrement P-T est probablement lié à la position de l'échantillon dans le CBF, à la frontière Ouest de la Zone Briançonnaise. Enfin la différence du pic de température entre la zone Houillère et les nappes de Guillestre, enregistrée par la MC et par les phyllosilicates étudiés, est cohérente avec le plongement global des structures vers le Sud. Des datations sur phengites à venir permettront de confirmer ces interprétations provisoires sur les âges de D1 et de proposer un modèle général d'évolution de cette partie de l'arc alpin.

7) PERSPECTIVES D'ETUDES :

Cette étude ouvre les portes d'une exploration plus précise des conditions de métamorphisme dans la région de Guillestre. En effet une étude plus systématique sur un nombre d'échantillons plus important permettrait de confirmer et d'affiner les résultats. D'un point de vue plus théorique, les difficultés rencontrés dans ces faciès nous encourage à continuer l'évolution des modèles thermodynamiques sur les micas et les chlorites, en particulier par l'étude de la distribution du Fe^{3+} dans les chlorites pour confirmer l'estimation théorique. Les premières tentatives effectuées au Synchrotron sont très encourageantes (cf. Annexe 5). La mise en place de calculs sur les couples chlorites - phengites qui tiendront compte de l'hydratation des micas est essentielle pour affiner les estimations de pression. Enfin, l'apparition de nouvelles méthodes RAMAN devrait permettre dans les années à venir d'estimer le pic thermique pour des températures inférieures à 300°C. Enfin, la datation des micas qui ont servi aux calculs thermobarométriques est essentielle pour comprendre le décalage de pression entre le Nord et le Sud et pour affiner l'origine des micas détritiques.

8) BIBLIOGRAPHIE :

- Barf  y J.-C., Lemoine M., De Graciansky P.-C., Tricart P., Mercier D. (1995) Carte géologique de la France au 50 000  me : Feuille de Briançon.
- Barf  y J.-C., Polino R., Mercier D., Caby R., Fourneaux J.-C (2006) Carte géologique de la France au 50 000  me : Feuille de Névache-Bardonecchia-Modane.
- Bernet M., Tricart P. (soumis) The Oligocene orogenic climax of the Southern Penninic Arc (Western Alps) : Insights from bedrock and detrital low-temperature thermochronology of the Barr  me basin, south-eastern France.
- Beyssac O., Goff   B., Chopin C., Rouzaud N. (2002) Raman spectra of carbonaceous material in metasediments : a new geothermometer. *J. metam. Geol.* Vol. 20 ; pp. 859-871.
- Beyssac O., Goff   B., petitet J.-P., Froigneux E., Moreau M., Rouzaud J.-N. (2003) On the characterisation of disordered and heterogeneous carbonaceous materials by Raman spectrometry. *Spectrochimica Acta ; Part A*, vol. 59 ; pp. 2267-2276.
- Bigi D., Cosentino M., Parotto M., Sartori R. & Scandone P. (1992) Structural model of Italy Scala 1:500,000 C.N.R., Quaderni Della Ricerca Scientifica vol. 114 ; p. 3.
- Bruan E. (2007), Pétrologie des métagabbros et des schistes lustres à travers le prisme d'accrétion du Queyras (Alpes Occidentales). Analyse de pseudosection et caractérisation thermique du graphite par spectrométrie Raman. M2R, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand-II. 50p.
- Castaing R. (1951) Applications des sondes electroniques a une méthode d'analyse ponctuelle chimique et cristallographique. Thèse, Phd, Université de Paris, publication ONERA vol. 55.

- Cathelineau M. & Nieva D. (1985) A chlorite Solid Solution geothermometer. The Los Azufres (Mexico) geothermal system. *Contrib. Mineral Petrol.* Vol. 91, pp. 235-244.
- Claudel M.-E & Dumont T. (1999) A record of multistage continental break-up on the Briançonnais marginal plateau (Western Alps) : Early and middle-late jurassic rifting. *Eclogae Geol Helv* ; Vol. 92 ; pp. 45-61.
- De Andrade V. (2006) De l'imagerie chimique à la micro-cartographie Pression-Température-Déformation : évolution minéralogique et transport de matière dans des systèmes en déséquilibre thermomécaniques. Applications aux métapélites et aux matériaux de stockage de déchets radioactifs. Thèse, Phd, Université Joseph Fourier – Grenoble I ; 198 p.
- DeAndrade, V., Vidal, O., Lewin, E., O'Brien, P. and Agard, P. (2006) Quantification of electron microprobe compositional maps of rock thin sections: an optimized method and examples. *J. Metam. Geol.*, Vol. 24, pp. 655-668.
- Debelmas (1955) Les zones subbriançonnaises et briançonnaises occidentales entre Callouise et Guillestre (Hautes Alpes). Thèse, Mémoires pour servir à l'explication de la carte géologie détaillée de la France, Paris, Imprimerie Nationale. 171p. 227p. 183 p.
- Debelmas J., Lemoine M., Goguel J (1966) Carte géologique détaillée de la France au 50 000ème Feuille de Guillestre. BRGM.
- Dubacq B. (2008) Thermodynamique des phyllosilicates de basse température : de l'approche macroscopique à la simulation atomistique. Thèse, Phd, Université Joseph Fourier – Grenoble I.
- Fabre R. (1982) Le paléozoïque briançonnais au Nord de Névache : analyse des déformations alpines dans un secteur axial de la zone briançonnais. Thèse, Phd, Université scientifique et médicale de Grenoble. 397 p.
- Fabre R., Gidon M., Tricart P. (1982) La structure du paléozoïque de la zone briançonnaise axiale au Nord de Névache. *Géol. Alp.* ; Vol. 58 ; pp. 31-52.
- Gabalda S., Beyssac O., Jolivet L., Agard P., Chopin C. (2008) Thermal structure of a fossil subduction wedge in the Western Alps. *Terra Nova* ; Doi: 10.1111/j.1365-3121.2008.00849x.
- Ganne J. (2003) Les dômes de socles HP-BT dans le domaine Pennique des Alpes nord-occidentales (massifs d'Ambin et de Vanoise Sud) : modalités de leur exhumation. Thèse, Phd, Université de Savoie.
- Gerber W. (2008) Evolution tectono-métamorphique du Briançonnais interne (Alpes Occidentales, massifs de Vanoise Sud et d'Ambin) : comportement du socle et de sa couverture dans un contexte de subduction continentale profonde. Thèse, Phd, Université Pierre et Marie Curie – Paris VI.
- Gignoux M., Moret L. (1938 a) Description géologique du bassin supérieur de la Durance. *Travaux du Laboratoire de Géologie de la faculté des sciences de l'Université de Grenoble.* T. 21.
- Goffé B., Schwartz S., Lardeaux J.M., Bousquet R. (2004) Explanatory notes to the map : metamorphic structure of the Alps western and Ligurian Alps. *Mitt. Osterr. Miner. Ges.* Vol 149 ; pp. 125-144.
- Hillier S. & Velde B. (1991) Octahedral occupancy and the chemical composition of diagenetic (Low-Temperature) Chlorites. *Clay Minerals* (1991) ; Vol. 26 ; pp. 149-168.

- Kerckhove C., & Piboule M. (1999) le « granite » du Plan de Phasy près de Guillestre (zone Briançonnaise durancienne des Alpes occidentales franco-italiennes) : un mythe centenaire. *Géol. Alp.*, Vol. 75 ; pp. 115-120.
- Kerckhove C., Gidon M., Pairis J.-L. (2005) Notice explicative de la feuille Embrun-Guillestre à 1/50 000. Edition du BRGM, Service géologique national.
- Le Fur F. (1998) Etude structurale et cinématique d'un réseau alpin de veines de quartz (Plan Bouchet – Zone Houillère Briançonnaise). DEA, Université Joseph Fourier – Grenoble 1. 22p.
- Parra T. (2001) Les équilibres Chlorite – Phengite : De l'étude de la lame mince aux calculs des trajets pression-température. Thèse, Phd, Université Paris XI, Orsay. 390p.
- Parra T., Vidal O., Agard P. (2002) A thermodynamic model for Fe-Mg dioctahedral K white micas using data from phase equilibrium experiments and natural polytic assemblages. *Contrib. Mineral. Petrol.* Vol 143, pp. 706-732.
- Salot P. (1978) Le métamorphisme dans les Alpes françaises. Thèse, Phd, Paris.
- Strzeczynski P., Guillot S., Leloup P.-H., Arnaud N., Vidal O., Ledru P., Courrioux G., Darmendrail X. (Soumis) Structural -metamorphic and ^{40}Ar - ^{39}Ar analysis in the Briançonnais zone (Modane Aussois area, Lyon Turin transect, western Alps). Integration in the Alpine Framework. *GSA Bulletin*.
- Tricart P. (1980) Tectoniques superposées dans les Alpes occidentales au Sud du Pelvoux. Evolution structurale d'une chaîne de collision. Thèse, Phd, Institut de Géologie, Strasbourg. 407p.
- Tricart P., Van Der Beek P., Schwartz S., Labrin E. (2007) Diachronous late-stage exhumation across the western Alpine arc : constraints from apatite fission-track thermochronology between the Pelvoux and Dora-Maira Massifs. *J. Geol. Soc. London*, Vol : 164 ; pp. 163-174.
- Velde B. (1955) Phengites micas : synthesis, stability, and natural occurrence. *Amer. J. Sci.* Vol. 263 ; pp. 886-913.
- Vidal, O. & Parra, T. (2000) Exhumation paths of high pressure metapelites obtained from local equilibria for chlorite-phengite assemblages *Geol. J.*, Vol. 35(3/4), pp. 139-161.
- Vidal O., Parra T., Trotet F. (2001) A thermodynamic model for Fe-Mg aluminous chlorite using data from phase equilibrium experiments and natural polytic assemblages in the 100-600°C, 1-25 Kbar P-T range. *Am. J. Sci.* Vol. 301, pp. 557-592.
- Vidal O., Parra T., Vieillard (2005) Experimental data on the Tschermak solid solution in Fe-chlorites : Applications to natural examples and possible role of oxidation. *Am. Mineral.* Vol 90 ; pp. 353-370.
- Vidal O., DeAndrade V., Levin E., Munoz M., Parra T., and Pascarelli S. (2006) P-T deformation Fe³⁺/Fe²⁺ mapping at the thin section scale and comparison with XANES mapping. Application to a garnet-bearing metapelite from the Sambagawa metamorphic belt (Japan). *J. Metam. Geol.* Vol. 24, pp. 669-683.
- Vidal O. (2009) Excel spreadsheet to calculate atom site repartitions for chlorite and mica and P-T-aH₂O-XFe³⁺ values. Disponible en ligne (Visité Juin 2009) <http://lgca.obs.ujf-grenoble.fr/perso/ovidal/downloads/Downloads.htm>